

Guía de diseño y especificación de madera contralaminada (CLT)

Cristóbal Reyes, Vicente López, Pablo Guindos

Guía de diseño y especificación de madera contralaminada (CLT)

Centro UC de Innovación en Madera (CIM UC), primera edición, diciembre de 2024.

Esta guía ha sido creada gracias al convenio de colaboración y transferencia entre la División Técnica de Estudio y Fomento Habitacional (DITEC) del Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile (MINVU) y el Centro de Innovación en Madera (CIM UC), en el marco del Plan de Emergencia Habitacional.

Cualquier reproducción total o parcial de este manual debe ser reconocido referenciando esta publicación:

Citación: “Reyes C., López V., Guindos P. (2024) *Guía de diseño y especificación de madera contralaminada (CLT). Centro UC de Innovación en Madera (CIM UC), primera edición, ISBN: 978-956-14-3406-6. Santiago, Chile*”.

English citation: “Reyes C., López V., Guindos P. (2024) *Cross-Laminated Timber (CLT) Design and Specification Guide (in Spanish). Timber UC Innovation Center (CIM UC), first edition, ISBN: 978-956-14-3406-6. Santiago, Chile*”.

ISBN: 978-956-14-3406-6

Autoría	Colaboradores	Diagramación	Ilustración
Cristóbal Reyes	Fabiana Lorca	Vanessa Naranjo	Vicente López
Vicente López	Diego Maige		Nicolás Salinas
Pablo Guindos			Cristóbal Reyes

Contraparte técnica DITEC MINVU

Susana Jara
Paula Olivares
Xavier Irazoqui
Camilo Lanata
Oscar Loyola

Los autores, colaboradores y editores no asumen ninguna responsabilidad por cualquier daño directo o indirecto, lesión, perjuicio o pérdida que pueda producirse o sufrirse como resultado del uso, la confianza, la aplicación y/o la referencia a la información incluida en esta publicación. Consulte a su jurisdicción local o a un profesional del diseño para asegurarse de que se cumplen las disposiciones legales y ordenanzas locales de construcción.

© 2024. Pontificia Universidad Católica de Chile, “Guía de diseño y especificación de madera contralaminada (CLT)”. Todos los derechos reservados.

PREFACIO

La construcción en madera se presenta hoy en día como una respuesta efectiva a los desafíos medioambientales y de productividad del sector construcción. El desarrollo de nuevos productos de ingeniería en madera que integran el concepto de industrialización y rápido montaje ha habilitado el desarrollo de edificaciones más eficientes y con una menor huella de carbono.

En este contexto, la madera contralaminada (CLT, por sus siglas en inglés) ha emergido como una de las soluciones constructivas más innovadoras y sostenibles dentro del ámbito de la ingeniería y la arquitectura. Su versatilidad, resistencia estructural y bajo impacto ambiental han posicionado al CLT como un material clave en la evolución de la construcción en madera, permitiendo la creación de edificaciones de gran altura y estructuras con un alto grado de eficiencia y precisión.

El CLT, si bien fue desarrollado hace más de 30 años, ha comenzado a usarse de manera masiva en los últimos 15 años, lo que ha generado un proceso acelerado de aprendizaje sobre su comportamiento, ventajas y oportunidades. Esto ha presentado un desafío para los diseñadores y montajistas, con formación o experiencia en el uso de materiales que han sido más tradicionales en Chile. Comprender aspectos fundamentales como el diseño estructural en CLT, su resistencia al fuego, comportamiento

higrotérmico y acústico, así como su durabilidad, es esencial para garantizar edificaciones más seguras y con un alto grado de confort interior.

El propósito de esta guía técnica es proporcionar a diseñadores, ingenieros estructurales, arquitectos y otros profesionales del sector una referencia integral y actualizada sobre el diseño y la especificación del CLT. Este documento aborda desde los conceptos básicos de fabricación y propiedades mecánicas del CLT hasta criterios avanzados de verificaciones estructurales y métodos de cálculo para evaluar su comportamiento ante el fuego. Además, se analizan las propiedades higrotérmicas y acústicas del CLT, como también su durabilidad natural y las estrategias para mejorarla. Todo esto acompañado de referencias normativas y recomendaciones para garantizar un diseño seguro, eficiente y conforme con los estándares nacionales e internacionales vigentes.

El desarrollo de esta guía ha sido impulsado por la creciente necesidad de contar con información técnica confiable que facilite la adopción del CLT en el mercado de la construcción en Chile. Un adecuado diseño en las construcciones en madera es fundamental y permite aprovechar y potenciar todas sus ventajas, promoviendo edificaciones sostenibles, eficientes y resilientes.

Enfrentar los desafíos de la industria de la construcción y la entrega de soluciones eficientes y sustentables para las personas, es un objetivo compartido por el Centro UC de Innovación en Madera, sus asociados y el Ministerio de Vivienda y Urbanismo. El trabajo colaborativo que se ha realizado para desarrollar este documento es el resultado de un profundo trabajo de investigación, validación industrial y normativa, para el cual todos estos actores han sido fundamentales.

Esperamos que esta guía sirva como una herramienta de apoyo para la toma de decisiones informadas en el diseño y la especificación del CLT, contribuyendo al avance de la construcción en madera y a la optimización de sus beneficios estructurales y ambientales.

Francisca Lorenzini
Directora Ejecutiva
Centro UC de Innovación en Madera

CONTENIDO

Prefacio	5
Contenido.....	6
Capítulo 1 Introducción	11
1.1 Breve historia y ventajas del CLT en la construcción	12
1.2 ¿Qué es el CLT?	13
1.3 Componente de capas (the layer structure).....	14
1.4 Objetivos y orientación de la guía.....	16
Referencias.....	17
Capítulo 2 Glosario y símbolos.....	19
2.1 Glosario	19
2.1.1 Capítulo 1 - Introducción	19
2.1.2 Capítulo 3 - Tipologías constructivas de madera masiva	19
2.1.3 Capítulo 4 - Diseño Estructural del CLT.....	20
2.1.4 Capítulo 5 - Fuego: resistencia y requerimientos	20
2.1.5 Capítulo 6 - Diseño higrotérmico	21
2.1.6 Capítulo 7 - Diseño de aislamiento acústico	21
2.1.7 Capítulo 8 - Durabilidad y preservación.....	21
2.2 Abreviaturas y acrónimos.....	23
Capítulo 3 Tipologías constructivas de madera masiva	25
3.1 Poste-viga (post and beam)	27
3.2 Poste-plataforma (post and platform)	29
3.3 Marco arriostrado (braced mass timber frame)	31
3.4 Paneles de madera masiva (mass timber panels)	33
3.5 Estructura laminar o cáscara (shell structure).....	35
Capítulo 4 Diseño estructural del CLT.....	39
4.1 Verificación de paneles de CLT	40
4.1.1 Resistencias características	41
4.1.2 Valores seccionales.....	42

4.1.3 Factores de modificación generales	50
4.1.4 Flexión	50
4.1.5 Cizalle	55
4.1.6 Compresión.....	60
4.1.7 Tracción	67
4.1.8 Combinaciones de esfuerzos.....	69
Referencias.....	71
Capítulo 5 Fuego: resistencia y requerimientos	73
5.1 Resistencia al fuego de la madera y particularidades del CLT	75
5.1.1 Combustión y carbonización de la madera.....	76
5.1.2 Método de la sección efectiva en CLT	77
5.1.3 Encapsulamiento: elementos protegidos mediante revestimiento	80
5.1.4 Verificación estructural	83
5.2 Requerimientos normativos.....	85
Referencias.....	87
Capítulo 6 Diseño higrotérmico.....	89
6.1 Desempeño higrotérmico inherente del CLT	90
6.1.1 Traspaso de calor: conductividad λ , resistencia R y transmitancia térmica U	90
6.1.2 Difusión de vapor: permeabilidad δ , factor de resistencia μ , permeancia W y resistencia al vapor de agua (Z_p)	91
6.1.3 Inercia térmica: admitancia térmica Y	93
6.2 Requerimientos normativos.....	94
6.2.1 Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones y Decreto 15	94
6.2.2 NCh1079 – Arquitectura y construcción – Zonificación climática y térmica para el diseño de edificaciones	96
6.2.3 NCh853 – Componentes y elementos para edificación – Resistencia térmica y transmitancia térmica – Métodos de cálculo	97
6.2.4 NCh1973 – Comportamiento higrotérmico de elementos y componentes de construcción - Temperatura superficial interior para evitar la humedad superficial crítica y la condensación intersticial - Métodos de cálculo.....	101
Referencias.....	106

Capítulo 7 Diseño de aislamiento acústico	109
7.1 Evaluación del comportamiento acústico en edificios y particularidades del CLT	110
7.1.1 Conceptos generales.....	110
7.1.2 Desempeño acústico inherente del CLT	113
7.1.3 ¿Cómo mejorar el rendimiento acústico de un proyecto o un componente de CLT?	116
7.2 Requerimientos normativos	122
7.2.1 Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones.....	122
7.2.2 Normativas complementarias para el cálculo del desempeño acústico.....	123
Referencias.....	125
Capítulo 8 Durabilidad y preservación	127
8.1 Durabilidad natural y propiedades intrínsecas de la madera.....	129
8.1.1 Características propias de la durabilidad del CLT.....	131
8.1.2 ¿Cómo mejorar la durabilidad de un componente o proyecto?	131
8.2 Durabilidad por diseño - Medidas constructivas de protección del CLT	133
8.2.1 Mecanismos de entrada, control y salida de la humedad.....	133
8.2.2 Medidas constructivas para la durabilidad – Puntos críticos	134
8.3 Durabilidad por tratamiento - Medidas de preservación del CLT	146
8.3.1 Preservación química de la madera.....	146
8.3.2 CLT pre-tratado.....	147
8.3.3 CLT post-tratado	148
8.3.4 Tipos de preservantes.....	149
8.4 Requerimientos normativos	149
8.4.1 Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones	149
8.4.2 NCh789/1 – Durabilidad de la madera.....	150
8.4.3 NCh819 – Madera preservada – Clasificación según riesgo de deterioro en servicio y muestreo	151
Referencias.....	156
Capítulo 9 Soluciones constructivas teóricas	159
9.1 Criterios de diseño	161
9.2 Muro Perimetral (MP)	162
9.2.1 Solución constructiva con menores requerimientos	162
9.2.2 Solución constructiva con mayores requerimientos.....	163

9.3 Muro Divisorio Simple (MD)	164
9.3.1 Solución constructiva con menores requerimientos	164
9.3.2 Solución constructiva con mayores requerimientos.....	165
9.4 Muro Divisorio Doble (MD)	166
9.4.1 Solución constructiva con menores requerimientos	166
9.4.2 Solución constructiva con mayores requerimientos.....	167
9.5 Muro Interior (MI)	168
9.5.1 Solución constructiva con menores requerimientos	168
9.5.2 Solución constructiva con mayores requerimientos.....	169
9.6 Entrepiso (EP)	170
9.6.1 Solución constructiva con menores requerimientos	170
9.6.2 Solución constructiva con mayores requerimientos.....	171
9.7 Techumbre (TE)	172
9.7.1 Solución constructiva con menores requerimientos	172
9.7.2 Solución constructiva con mayores requerimientos	173
Referencias	174
Índice de figuras	175
Agradecimientos.....	177



CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El CLT (*Cross Laminated Timber*), traducido al español como madera contralaminada, es un material de construcción relativamente nuevo, que pareciera estar en el centro de una revolución de la industria de la construcción a nivel mundial, que recién comienza en este siglo XXI.

Por milenios han sido tomados en cuenta sólo dos aspectos generales en la decisión de crear una nueva estructura: los técnicos y los económicos. ¿Se puede físicamente construir? y ¿existen los recursos monetarios para materializarlo? Sin duda estos aspectos han desencadenado en obras extraordinarias, la creación de hogares para millones de personas, la invención de nuevos materiales y formas de combinarlos y al desarrollo infraestructural en el que vivimos hoy en día.

Sin embargo, entre la década de 1960 y de 1970 surge un tercer aspecto que obligó a transformar las grandes industrias, replanteando las priorida-

des empresariales, las políticas gubernamentales y la conciencia de la sociedad: la sustentabilidad. Se ha establecido una preocupación generalizada entorno a las emisiones de dióxido de carbono y el consecuente cambio climático, al consumo energético de los edificios y sus fuentes, a la extracción de recursos naturales no renovables, a la contaminación ambiental del aire, el agua y la tierra, a la gestión de residuos de demolición, entre otros desafíos de la sustentabilidad y metas mundiales como los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU o el Acuerdo de París de la COP21.

En este contexto, comienza el resurgir de la madera como material de construcción y su nueva valorización por su captura de carbono en la etapa de crecimiento, su alta tasa de renovación y su baja emisión de residuos. Junto con un manejo, gestión y certificación sostenible de las plantaciones productivas, la madera se ha situado como uno de los materiales con mayor potencial sustentable.

A la par del material con el que se construye, esta revolución viene con una nueva forma de construir: la construcción industrializada. Basada en conceptos claves como la prefabricación, productividad, digitalización e innovación, y diseñada con tecnologías de la información, el enfoque DfMA y herramientas BIM, la construcción industrializada busca lograr eficiencia, seguridad y calidad en todas las etapas de construcción.

Ambos mundos, la madera y la construcción industrializada, se cruzan y combinan a la perfección en el CLT, ofreciéndose como uno de los sistemas constructivos del futuro con un actual crecimiento exponencial de la cantidad de proyectos ejecutados con este material y un interés cada vez mayor de arquitectos, diseñadores, ingenieros e inversores.

Este escenario crea una gran oportunidad para Chile y un desafío aún mayor para los promotores de la construcción en madera a nivel nacional. La oportunidad no solo radica en ser un país forestal por excelencia, con una superficie de plantaciones forestales de más de 3 millones de hectáreas y una potencia exportadora a nivel mundial. En el caso del CLT, la verdadera oportunidad está en que la balanza de toma de decisión aún está fácilmente inclinable sobre una u otra metodología, ya que,

a diferencia del entramado ligero que es un sistema constructivo ya consolidado en Chile tanto de forma tradicional como industrial, con edificios construidos de hasta 6 pisos y procesos bastante estandarizados, el CLT aún está en sus primeras etapas de desarrollo nacional con la industria sumamente abierta a mejoras, cambios y aprendizajes.

Por otra parte, el desafío radica en inclinar la balanza para el lado correcto. Recomendar las metodologías de diseño que mejor se adapten a la realidad nacional, redactar normas a la altura de la tecnología actual con el horizonte en el futuro y colaborar interdisciplinariamente para el desarrollo de proyectos ejemplares que inspiren a la masificación del uso del CLT, son desafíos con los que se tienen que comprometer los promotores de la construcción en madera a nivel nacional. Afortunadamente, la globalización nos permite no partir desde cero, sino que recoger toda la experiencia y conocimiento que se ha generado en Europa, Norteamérica, Oceanía y Asia, adaptarlo a la realidad nacional y aprovechar sus años de adelanto para impulsar esta tecnología con una base fundamentada, clara y realista.

1.1 BREVE HISTORIA Y VENTAJAS DEL CLT EN LA CONSTRUCCIÓN

El desarrollo del CLT comenzó en Europa, específicamente en Austria y Alemania, en la década de 1990, como respuesta a la necesidad de un material de construcción sostenible y eficiente que pudiera competir con el hormigón armado y el acero. Desde entonces, ha ganado popularidad en todo el mundo, siendo ampliamente utilizado en Europa y América del Norte, Oceanía y Asia Oriental, habiéndose construido edificios icónicos como el Mjøstårnet en Noruega de 85,4 metros y 18 pisos en estructura 100% de madera o el Ascent en Estados Unidos de 86,6 metros y 25 pisos en una estructura híbrida de madera y hormigón armado, siendo actualmente el edificio más alto en madera del mundo, ver Figura 1.1.



Mjøstårnet, Noruega. Photo: © Moelven.



Ascent, Estados Unidos.

Fuente: [https://www.skyscrapercenter.com/building/
id/34292](https://www.skyscrapercenter.com/building/id/34292)

Figura 1.1 - Edificios de madera masiva más altos del mundo al 2024.

Su interés en Chile se remonta al 2011, año en que se fabricó el primer panel de CLT y a partir del cual se observa un crecimiento suave y paulatino en la cantidad de proyectos, en su mayoría privados, y en publicaciones científicas entorno al sistema constructivo. Quizá el proyecto de mayor relevancia a la fecha es el edificio experimental Torre PymeLab de la Universidad del Bío Bío, finalizada su construcción en el año 2022 con 5 pisos de altura y constantes investigaciones sobre el desempeño sísmicos y el confort ambiental.

Una de las particularidades más destacables del CLT es que cuenta con un espectro holístico de ventajas en el ámbito de la construcción, desde su funcionalidad hasta su estética pasando por su sustentabilidad. En términos de propiedades mecánicas, su configuración de capas cruzadas transforma el unidireccionalismo de la madera a una dimensión bidireccional que proporciona una alta resistencia y rigidez tanto en su plano, como fuera de él. Esta disposición ortogonal de las capas mejora sustancialmente su estabilidad dimensional y minimiza las deformaciones y pandeos gracias a su robustez. Por otra parte, la naturaleza de su confección en fábrica favorece altos grados de prefabricación, industrialización y personalización de cada elemento, logrando niveles de precisión milimétrica en la producción, que se traducen en una importante reducción de residuos y tiempos de montaje en terreno, permitiendo una construcción rápida y eficiente.

En cuanto a su sustentabilidad, al ser la madera un material renovable y en la medida que provenga de plantaciones con un manejo y gestión forestal sostenible, su vida útil se traduce en una huella de carbono considerablemente menor en comparación con materiales tradicionales de construcción como el acero y el hormigón armado. Por último, el CLT también ofrece excelentes propiedades de aislamiento térmico, mejorando la eficiencia energética y el confort de los edificios, además de una buena resistencia al fuego debido a su grosor y a la formación de una capa carbonizada que protege las capas internas. Su uso sin embargo requiere de

un diseño interdisciplinario en etapas tempranas de proyecto, y es de ese modo como todas las ventajas del CLT tienen el potencial de materializar estructuras costo-económicamente competitivas durante toda su vida útil.

1.2 ¿QUÉ ES EL CLT?

Este producto surgió como respuesta a la necesidad de aprovechar la versatilidad y las propiedades naturales de la madera, pero con mayores capacidades estructurales. Tradicionalmente, el tamaño de los elementos de madera estaba limitado por las dimensiones del árbol del cual se extraían las piezas, lo que dio origen a los productos de la familia de la **madera maciza**. Con el tiempo, la industria se fue alineando con la realidad de la producción maderera en masa, que suele caracterizarse por la utilización de especies coníferas provenientes de bosques con gestión silvícola y rápida rotación, que limita la disponibilidad de grandes piezas de madera en el corto plazo.

Para superar estas limitaciones y permitir la fabricación de elementos en serie de mayor tamaño y mejor desempeño, se desarrollaron los productos de **madera masiva**. Estos se caracterizan por estar formados por la unión de piezas más pequeñas de madera aserrada, utilizando adhesivos o fijaciones mecánicas. Entre ellos, surge el CLT como un material de construcción innovador compuesto por capas de láminas de madera dispuestas perpendicularmente y unidas mediante adhesivos estructurales, conformando un panel masivo.

Esta configuración proporciona una alta estabilidad dimensional y una considerable resistencia mecánica, permitiendo su uso en una amplia variedad de aplicaciones estructurales, desde edificios residenciales hasta estructuras de gran altura y puentes. Además, esta configuración permitió crear productos con una mayor redundancia estructural, lo que proporciona propiedades estructurales más uniformes, con menos desviaciones estadísticas

y mayor similitud estructural entre los distintos paneles. Esto hace que el CLT sea un material más predecible y estandarizable.

Para armar estos paneles se siguen ciertos rangos de dimensiones en la industria. Por un lado, estos paneles suelen estar formados por 3, 5 o 7 capas, pudiendo incluso llegar a 9 u 11, siendo simétrico desde la capa central. Los espesores totales varían en función del espesor y la cantidad de capas, generalmente en un rango entre 60 y los 400 [mm]. Por último, respecto a su ancho y alto, si bien las dimensiones son técnicamente ilimitadas, estas están restringidas, por las características del proyecto, la capacidad del fabricante o del transporte. Actualmente las dimensiones máximas utilizadas internacionalmente rondan los 4 metros de ancho y 22 de largo, mientras que a nivel nacional a la fecha se fabrican paneles de hasta 3,4 metros de ancho y 13,5 de largo.

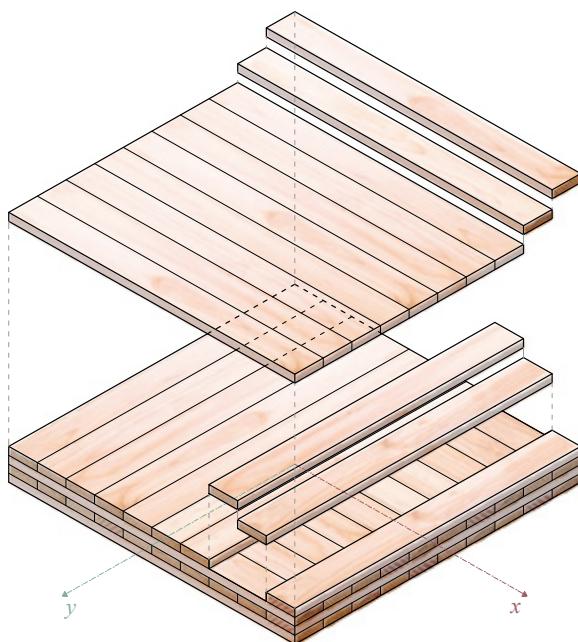


Figura 1.2 - EL CLT y su configuración bidireccional

1.3 COMPONENTE DE CAPAS (THE LAYER STRUCTURE)

Los diversos estándares de seguridad, confort habitacional y vida útil caracterizan a las soluciones constructivas de ser sistemas compuestos por varias capas con distintas funcionalidades, dispuestas de manera estratégica para cumplir múltiples requisitos. Un buen diseño y disposición de estas capas permite cumplir los diversos requerimientos estructurales, de resistencia al fuego, de confort higrotérmico, de confort acústico y de durabilidad; además de favorecer una ocupación eficiente y reducir el impacto ambiental.

El CLT funciona como el elemento estructural principal en este sistema de capas, por lo que es relevante comprender las propiedades inherentes en relación con los distintos requerimientos de desempeño. A partir de este, se añaden las capas adicionales, tanto hacia el interior como hacia el exterior, necesarias para cumplir las exigencias funcionales del sistema. Estas se pueden agrupar en los siguientes conceptos:

Revestimiento exterior		(exterior cladding)
Barrera de humedad		(water resistive barrier)
Capa aislante	CLT	(thermal insulation)
Barrera de viento o de aire	CLT	(air barrier)
Barrera de vapor	CLT	(vapour barrier)
Capa estructural	CLT	(structural layer)
Capa de instalaciones		(instalation layer)
Capa resistente al fuego	CLT	(fire resisting layer)
Revestimiento interior	CLT	(interior lining)

El orden y la necesidad de incorporar o no cierta capa depende siempre de las condiciones del proyecto, tanto climáticas exteriores como de uso interior. Cada concepto de capa cumple una función específica, existiendo algunos productos que tienen propiedades multifuncionales permitiendo representar 2 o más capas al mismo tiempo, como es el caso del CLT. Como se presenta en los siguientes capítulos, el CLT es capaz de representar no solo la capa estructural, sino que también cumple funciones de barrera de aire y barrera de vapor, tiene un aporte considerable como capa aislante y capa resistente al fuego y por último, gracias a su apariencia, es deseable también como revestimiento interior.

Entre estas capas, es relevante hacer una diferenciación respecto a las barreras de humedad, viento y vapor. La primera, la **barrera de humedad** corresponde a elementos impermeables diseñados para evitar la infiltración de agua líquida en las edificaciones. En segundo lugar, la **barrera de viento o de aire**, es una barrera de hermeticidad diseñada para evitar filtraciones de aire y mejorar el confort térmico. Por último, la **barrera vapor**, corresponde a materiales que están diseñados para controlar la difusión de vapor de agua a través de ellos, impidiendo la condensación intersticial (Vargas et al., n.d.).

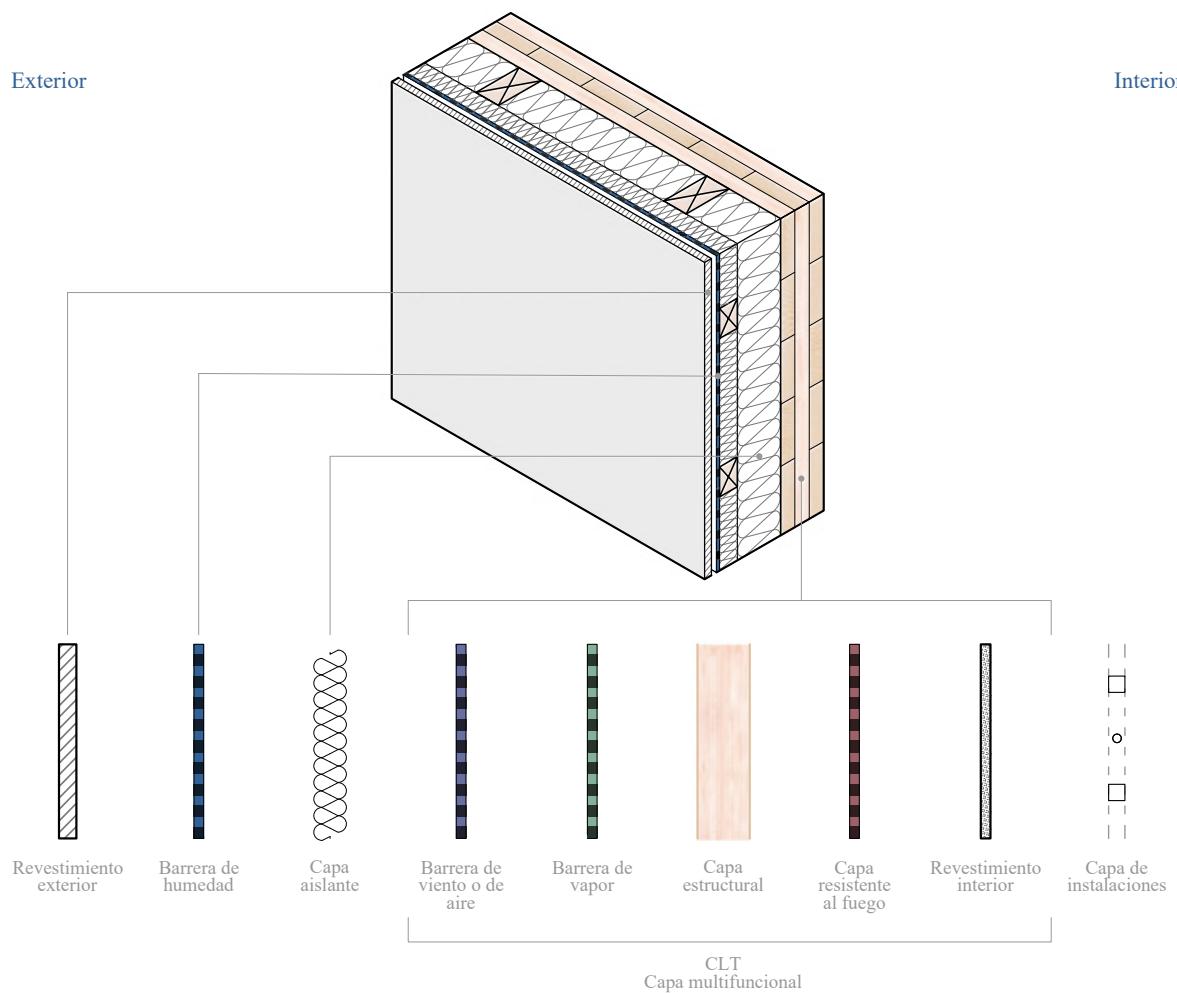


Figura 1.3 - Componente de capas (the layer structure)

1.4 OBJETIVOS Y ORIENTACIÓN DE LA GUÍA

Entre los 3 aspectos generales en la decisión de crear una nueva estructura – técnicos, económicos y sustentables – esta guía tiene el objetivo principal de entregar la información y herramientas necesarias para orientar el diseño de los principales aspectos técnicos, abarcando las distintas tipologías constructivas (Capítulo 3) el diseño estructural (Capítulo 4), la resistencia al fuego (Capítulo 5), el confort higrotérmico (Capítulo 6), el confort acústico (Capítulo 7) y la durabilidad (Capítulo 8), para ayudar todo lo posible a los proyectistas en el diseño de edificios de CLT. A través de esta guía, se pretende:

- i. Introducir distintas tipologías estructurales en que puede desenvolverse el CLT.
- ii. Explicar detalladamente las distintas verificaciones estructurales para el diseño de paneles de CLT.
- iii. Explicar detalladamente uno de los distintos métodos de cálculo para predecir el efecto del fuego en paneles de CLT protegidos o no.
- iv. Presentar las propiedades inherentes del CLT como elemento aislado y como componente de capas, que influyen en las prestaciones higrotérmicas y acústicas de los edificios.

- v. Presentar la durabilidad natural del CLT y cómo mejorarla mediante medidas constructivas y tratamientos de preservación química.
- vi. Relacionar el desempeño inherente del CLT con los requerimientos no estructurales establecidos en la normativa chilena y presentar las estrategias para cumplirlos.
- vii. Agrupar los distintos requerimientos y funciones por capa en soluciones constructivas teóricas y genéricas que sirvan como base guía para desarrollar las soluciones particulares de cada proyecto.

Esta guía está dirigida a arquitectos, ingenieros estructurales, proyectistas y profesionales de la industria de la construcción que buscan diseñar en detalle estructuras de CLT, basado en el cumplimiento de las normativas nacionales y complementadas con bibliografía internacional. Esta guía se enfoca en aquellos profesionales que ya tienen conocimientos teóricos básicos del diseño y construcción en madera, y están interesados en extenderlo al CLT como sistema constructivo para diseñar edificios.

Este guía se redactó utilizando la normativa chilena vigente a su fecha de publicación. Para referencias con fecha, sólo se aplica la edición citada. Para referencias sin fecha se aplica la última edición del documento referenciado.

REFERENCIAS

Vargas, M., Fernando, M., Prado, G., Fonseca, M. C., Alonso, A., & Arellano, R. (n.d.). *Términos de referencia para el estudio de Protección por diseño en Construcción en Madera.*



CAPÍTULO 2

GLOSARIO Y SÍMBOLOS

2.1 GLOSARIO

2.1.1 Capítulo 1 - Introducción

Barrera de humedad: elementos impermeables diseñados para evitar la infiltración de agua líquida en las edificaciones.

Barrera de vapor: materiales que están diseñados para controlar la difusión de vapor de agua a través de ellos, impidiendo la condensación intersticial.

Barrera de viento o aire: una barrera de hermeticidad diseñada para evitar filtraciones de aire y mejorar el confort térmico.

Madera maciza: pieza de madera obtenida directamente del tronco del árbol, manteniendo sus características naturales como nudos, vetas y tonalidades.

Madera masiva: producto de ingeniería de madera fabricado a partir de la unión estructural de dos o más piezas de madera maciza o madera de ingeniería, formando paneles de gran tamaño.

2.1.2 Capítulo 3 - Tipologías constructivas de madera masiva

Entramado ligero: sistema conformado por piezas de pequeña escuadria que pueden ser transportadas fácilmente por una o dos personas. Consiste en un sistema con una gran cantidad de elementos repetitivos dispuestos a distancias regulares y por ende posee una alta redundancia estructural. Este tipo de sistemas emplea algún tipo de rigidizador lateral, habitualmente tableros estructurales, conformando así sistemas de muros y losas, en que la madera estructural no queda expuesta.

Entramado pesado: sistema constructivo en madera que utiliza piezas macizas y/o encoladas de grandes secciones que no pueden ser transportadas fácilmente por una o dos personas. Consiste en un sistema con menor número de elementos y por ende menor redundancia estructural en comparación al entramado ligero. Generalmente los elementos estructurales quedan expuestos arquitectónicamente.

Sistema estructural: conjunto de elementos estructurales (como vigas, columnas, losas, muros, etc.) que tiene como función resistir y transmitir las cargas de la estructura hacia las fundaciones. Define cómo se comporta estructuralmente una construcción.

Tipología constructiva: forma general de construir un edificio o estructura, que combina decisiones sobre materiales, técnicas constructivas y organización espacial. Define cómo está hecha una construcción.

2.1.3 Capítulo 4 - Diseño Estructural del CLT

Anclaje de corte: elemento de placas de acero diseñado para limitar el deslizamiento de un muro de corte.

Anclaje de vuelco: elemento de acero diseñado para limitar el levantamiento como sólido rígido de un muro de corte.

Resistencia característica: valor característico de la capacidad de un elemento estructural frente a un esfuerzo simple.

Solicitud: fuerza o tensión producto de un estado de carga o combinación de cargas a la que está sometido un elemento estructural.

Tensión de diseño: capacidad de diseño para el método ASD, producto de la resistencia característica por un factor de conversión y los factores de modificación que resulten pertinentes.

2.1.4 Capítulo 5 - Fuego: resistencia y requerimientos

Protección activa (frente al fuego): la compuesta por sistemas que, conectados a sensores o dispositivos de detección, entran automáticamente en funcionamiento frente a determinados rangos de partículas y temperatura del aire, descargando agentes extintores de fuego tales como agua, gases, espumas o polvos químicos.

Protección pasiva (frente al fuego): la que se basa en elementos de construcción que por sus condiciones físicas aíslan la estructura de un edificio de los efectos del fuego durante un determinado lapso de tiempo, retardando su acción y permitiendo en esa forma la evacuación de sus ocupantes antes del eventual colapso de la estructura y dando, además, tiempo para la llegada y acción de bomberos. Los elementos de construcción o sus revestimientos pueden ser de materiales no combustibles, con capacidad propia de aislación o por efecto intumesciente o sublimante frente a la acción del fuego. (OGUC)

2.1.5 Capítulo 6 - Diseño higrotérmico

Barrera de humedad: membrana hidrófuga que evita el paso del agua líquida del exterior al interior de un recinto. Normalmente es permeable al vapor (respirable) para permitir que el vapor de agua escape desde el interior hacia el exterior, previniendo la condensación intersticial.

Capa térmicamente homogénea: capa de espesor constante que tiene propiedades térmicas uniformes o que pueden ser consideradas como uniformes.

Envolvente térmica: Conjunto que forman los elementos perimetrales de una edificación en los cuales se cumplen las exigencias de acondicionamiento térmico señaladas en la OGUC y que, a su vez, la separan de un recinto no acondicionado o de elementos del ambiente exterior, tales como terreno, aire, agua, asoleamiento, temperatura, humedad u otros.

Infiltraciones de aire: el paso de aire sin control a través de grietas ocultas y aberturas no previstas en la envolvente.

Temperatura de rocío o punto de rocío: es la temperatura máxima a la cual el ambiente se satura, es decir que no es capaz de contener más vapor de agua y por ende lo condensa. Si la temperatura de un objeto está por debajo de la temperatura de rocío del ambiente, el agua contenida en el aire se condensará en la superficie o en el interior del objeto.

2.1.6 Capítulo 7 - Diseño de aislamiento acústico

Aislación acústica: propiedad que tienen los materiales para disipar o atenuar el ruido que incide sobre ellos.

Aislamiento acústico: estudio entre la transmisión del ruido aéreo y ruido de impacto entre dos recintos diferentes; o propiedad que tienen los materiales para disipar o atenuar el ruido que incide sobre ellos.

Producto anti-vibratorio: componente diseñado para desacoplar componentes sólidos y evitar la transmisión de ruido.

Producto fonoabsorbente: componente diseñado para absorber el ruido.

Producto fonoaislante: componente diseñado para aislar el ruido.

Ruido: sonido molesto para el humano.

Sonido: cualquier fenómeno que involucre la propagación de ondas mecánicas a través de un medio fluido o sólido con una frecuencia dentro del rango audible (para los humanos entre 20 y 20.000 [Hz])

2.1.7 Capítulo 8 - Durabilidad y preservación

Albura: capa o zona fisiológicamente activa, de color generalmente claro, situada entre el duramen y el cambium.

Durabilidad conferida de la madera: tiempo prolongado de la resistencia a agentes de deterioro que se puede lograr mediante medidas constructivas o un tratamiento protector.

Durabilidad natural de la madera: resistencia intrínseca de la madera frente al ataque de los distintos organismos xilófagos. Tal resistencia es diferente para cada especie maderera frente a cada agente de deterioro. Está referida a maderas que no han sido sometidas a ningún tratamiento de preservación o modificación.

Duramen o corazón: parte central del tronco del árbol, constituida por células fisiológicamente inactivas y en las que los materiales de reserva han sido eliminados o transformados. Generalmente de color más oscuro que la albura.

Impregnabilidad: capacidad que presenta una especie de madera a la penetración de un líquido (por ejemplo, un preservante).

Madera modificada: resultado de una interacción entre la madera y un agente químico, biológico o físico, que permite, sin adicionar un biocida, mejorar alguna de sus propiedades durante la vida de servicio del material, resultando en un nuevo material con una estructura molecular alterada.

Permeabilidad: propiedad de la madera relativa a la mayor o menor facilidad de flujo de un fluido a través de ella.

Post-tratamiento: preservación química aplicada en el producto masivo posterior a su encolado.

Preservación química: técnica de proteger la madera, mediante la aplicación de preservantes contra el deterioro y destrucción causados por organismos xilófagos.

Preservante hidrosoluble: preservante soluble en agua.

Preservante soluble en líquidos orgánicos: uno o varios productos químicos que se usan disueltos en un solvente de tipo orgánico.

Preservante: producto o mezcla de sustancias químicas científicamente dosificadas y normalizadas, de efectividad comprobada, para ser aplicadas a la madera con el objeto de protegerla contra el ataque de organismos destructores y prolongar la vida útil de la madera. Se distinguen tres tipos de preservantes: hidrosolubles, solubles en líquidos orgánicos y creosotados.

Pre-tratamiento: preservación química aplicada en láminas individuales previo al encolado.

2.2 ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

OGUC	Ordenanza General de Urbanismo y Construcción	LVL	Laminated Veneer lumber
CLT	Madera contralaminada (<i>Cross laminated timber</i>)	LOSCAT	Listado Oficial de Soluciones Constructivas para el Acondicionamiento Térmico
MLE	Madera laminada encolada (<i>Glued laminated timber; Glulam; GLT</i>)	LOSCAA	Listado Oficial de Soluciones Constructivas para Aislamiento Acústico
COV	Compuesto orgánico volátil (<i>Volatile Organic Compound, VOC</i>)	LOSCE	Listado Oficial de Comportamiento al Fuego de Elementos y Componentes de la Construcción
NLT	<i>Nailed laminated timber</i>	PDA	Plan de Descontaminación Atmosférica
DLT	<i>Dowel laminated timber</i>		



CAPÍTULO 3

TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS DE MADERA MASIVA

El desarrollo de productos de madera masiva ha permitido que la madera compita estructuralmente con materiales tradicionales en ciertos tipos de estructuras en las que antes no era concebible o físicamente lograble, como lo son edificaciones de mediana y gran altura o infraestructuras de

grandes luces. Este producto de ingeniería de alto estándar contribuye a superar las limitaciones del entramado ligero y extender el abanico de **tipologías constructivas** en madera.

Las tipologías constructivas de madera masiva para edificaciones se caracterizan por su flexibilidad y versatilidad. A diferencia de materiales tradicionales como el hormigón armado y el acero, que cuentan con arquetipos bien definidos debido a su amplio uso y estandarización, actualmente la madera masiva carece de arquetipos establecidos. Esto implica que muchos edificios tienden a interpretar y adaptar estas tipologías de manera distinta según las necesidades específicas de cada proyecto. Esta falta de estandarización no solo representa un desafío técnico, sino también una oportunidad, ya que ofrece una flexibilidad de diseño tanto arquitectónica como estructural, convirtiendo incluso la tipología constructiva en un objetivo principal de diseño.

La elección de la tipología constructiva para un proyecto en particular está principalmente influenciada por el diseño arquitectónico, el uso y el presupuesto disponible. Además, suelen estar presentes otras variables, como los productos ofrecidos por el mercado o las limitaciones logísticas asociadas.

La Tabla 3.1 presenta las principales tipologías constructivas de la madera masiva y sus variantes más comunes¹, enmarcado en el **sistema estructural** que las sustenta. Cabe mencionar que, para efectos prácticos, se omiten los sistemas híbridos, ya que, en la práctica, la combinación de sistemas y tipologías es muy común, dando lugar a una variedad de configuraciones que parecieran ser infinitas. En las siguientes secciones, se profundiza en estas tipologías constructivas de madera masiva, destacando sus características, aplicaciones y ventajas en distintos contextos arquitectónicos, estructurales y constructivos.

1. Las variantes presentadas para las tipologías poste-viga y poste-plataforma son las propuestas por David Bowick (2019) en el artículo para Mass Timber Primer <https://www.canadianarchitect.com/mass-timber-primer/>

TABLA 3.1 – Sistemas estructurales madera masiva

Sistema estructural <i>Structural system</i>	Tipología constructiva <i>Construction Typology</i>	Variante
		<i>Long Beam Short Deck</i>
		<i>Short Beam Long Deck</i>
		<i>Beams and Girders</i>
		<i>Two-Way Beams</i>
		<i>Reciprocal Frame</i>
	<i>Poste-viga Post and beam</i>	<i>Staggered Deck</i>
		<i>Cassette</i>
		<i>Nervi</i>
Marco de momento		<i>DELTABEAM®</i>
		<i>Zollinger Lamella</i>
		<i>Triple Beam</i>
		<i>Point-Supported CLT</i>
		<i>Wide Flat Beams – Beams on the Bottom</i>
	<i>Poste-plataforma Post and platform</i>	<i>Wide Flat Beams – Beams on Top</i>
		<i>Wide Flat Beams – Beams Flush</i>
		<i>Stressed Skin Lattice</i>
		<i>VCTC</i>
Marco arriostrado	<i>Marco arriostrado Braced frame</i>	
Muros	<i>Paneles de madera masiva Mass timber panels</i>	<i>Plataforma</i>
		<i>Balloon</i>
Estructura laminar (cáscara)	<i>Shell structure</i>	

3.1 POSTE-VIGA (POST AND BEAM)

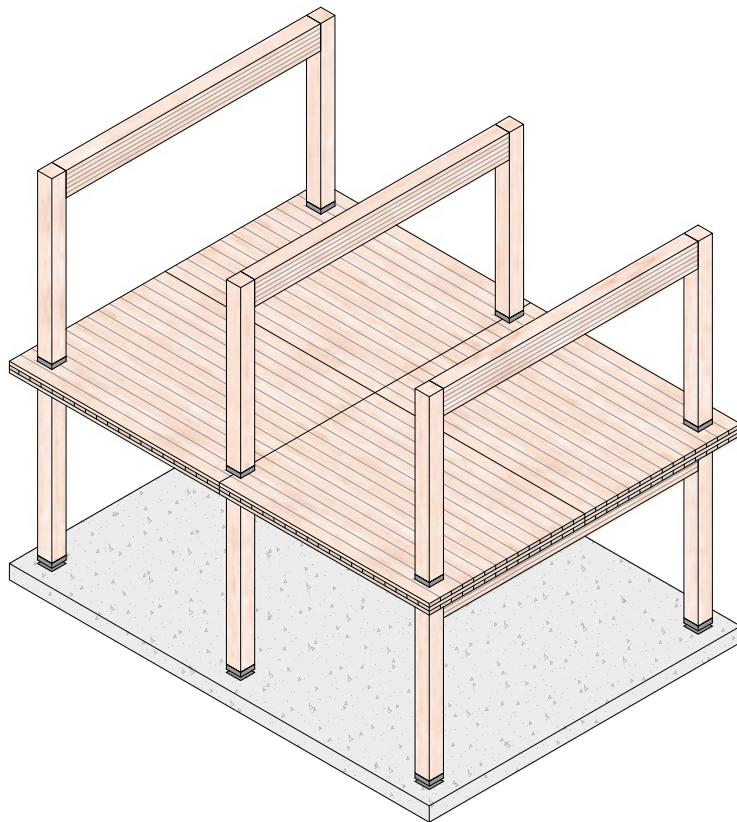


Figura 3.1 – Esquema de tipología poste-viga

La tipología constructiva poste-viga puede considerarse como la más clásica y elemental de las tipologías en madera. Estructuralmente se basa en un sistema de marco compuesto por columnas (postes) y vigas de grandes escuadrias, lo que clásicamente se denominó **entramado pesado** (*heavy timber*). Esta tipología ha sido utilizada desde hace siglos, originalmente con grandes piezas de madera maciza, con las que se construyeron templos, galpones y edificios de baja altura. Actualmente las columnas y vigas son materializadas en productos de madera masiva como el MLE y el LVL.

Siguiendo la trayectoria de carga gravitacional, esta tipología se compone de una losa de madera masiva, usualmente de CLT², que descarga sobre vigas secundarias, luego estas sobre las vigas principales

y estas últimas sobre las columnas, hasta dirigir la carga a las fundaciones. El uso de vigas secundarias e incluso terciarias son variantes opcionales. Según la disposición de vigas y las costuras a la losa, el CLT puede trabajar unidireccional o bidireccionalmente.

Esta tipología constructiva presenta diversas características que ofrecen ventajas y desventajas en diferentes aspectos del diseño arquitectónico, estructural y constructivo. En aspectos arquitectónicos, destaca por su flexibilidad para adaptarse a una amplia variedad de usos junto con su capacidad para materializar grandes luces que permite crear espacios amplios y funcionales. Sin embargo, soportar luces grandes, implica el uso de vigas con mayor altura, lo que puede significar una mayor altura de entrepiso. Esto podría ser una limitante

2. Esto depende del sistema adoptado, ya que pueden existir variantes que permiten que las losas trabajen en dos sentidos. Por lo tanto, no es una característica excluyente.

en edificaciones con restricción de altura, afectando la eficiencia en la ocupación del espacio disponible.

Respecto a la ingeniería estructural, como se mencionó anteriormente, la tipología poste-viga es, en esencia, un sistema de marco. Esto implica que puede ser un **marco de momento** o un **marco arriostrado lateralmente**. En el caso de un marco de momento, las uniones viga-columna capaces de transferir momento serán el punto crítico del

funcionamiento del sistema, mientras que el marco arriostrado lateralmente puede ser mediante un núcleo rígido o bien un sistema de diagonales (que da origen a la tipología constructiva de la sección 3.3)

Por último, en la fase montaje, al utilizar una gran cantidad de elementos y conexiones, esta tipología puede extender los tiempos de ejecución en comparación a otras tipologías constructivas de madera masiva.



Figura 3.2 - Ejemplo de tipología poste-viga.

Fuente: <https://leverarchitecture.com/innovation/what-is-crosslaminated-timber>

3.2 POSTE-PLATAFORMA (POST AND PLATFORM)

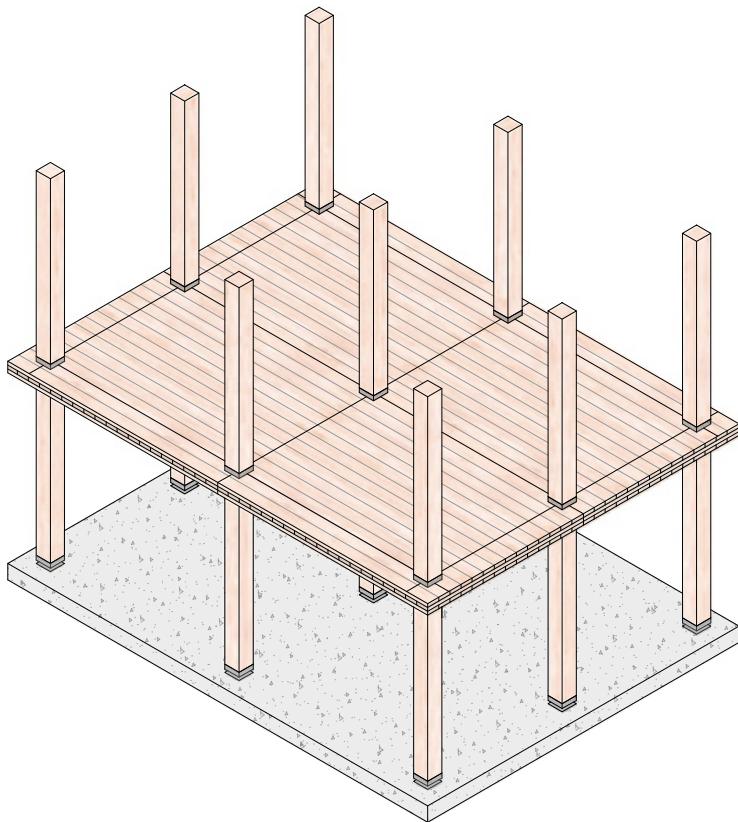


Figura 3.3 – Esquema de tipología poste-plataforma

La rigidez y resistencia fuera del plano del CLT dio origen a la tipología poste-plataforma, pudiendo prescindir de las vigas del poste-viga, es decir, se compone únicamente por losas soportadas puntualmente por las columnas. Esta tipología se rige por una modulación determinada por las dimensiones de los paneles de losas, influida por factores como la capacidad de fabricación, transporte y montaje. Esta modulación genera una grilla estructural simple que requiere de columnas en los 4 vértices de cada panel.

En el diseño arquitectónico, el uso de una grilla como condición inicial implica que las operaciones de diseño para la distribución de los espacios

deben seguir una lógica de modulación para optimizar el uso del espacio. Este enfoque hace que la tipología poste-plataforma sea más compatible con edificaciones que buscan implementar un patrón repetitivo en la distribución de las plantas. También, es considerado una alternativa adecuada en proyectos con restricciones de altura, ya que, al no incluir vigas, el espesor estructural de los elementos horizontales es menor en comparación a otras tipologías constructivas.

Respecto del diseño estructural, quizá la mayor diferencia es el uso evidente del bidireccionalismo del CLT, trabajando en flexión tanto el eje fuerte como el débil. Esto implica losas de grandes espesores y de

5 capas como mínimo. Otra característica relevante es el apoyo directo de las losas sobre las columnas, lo que genera ciertos desafíos para evitar el punzonamiento, pudiendo resolverse con conexiones especiales, capiteles, refuerzos, entre otros.

Por último, en la fase de construcción, esta tipología ofrece la ventaja de un montaje rápido, con pocas conexiones y mucha repetitividad, gracias a su modularidad, reduciendo así los tiempos de construcción.

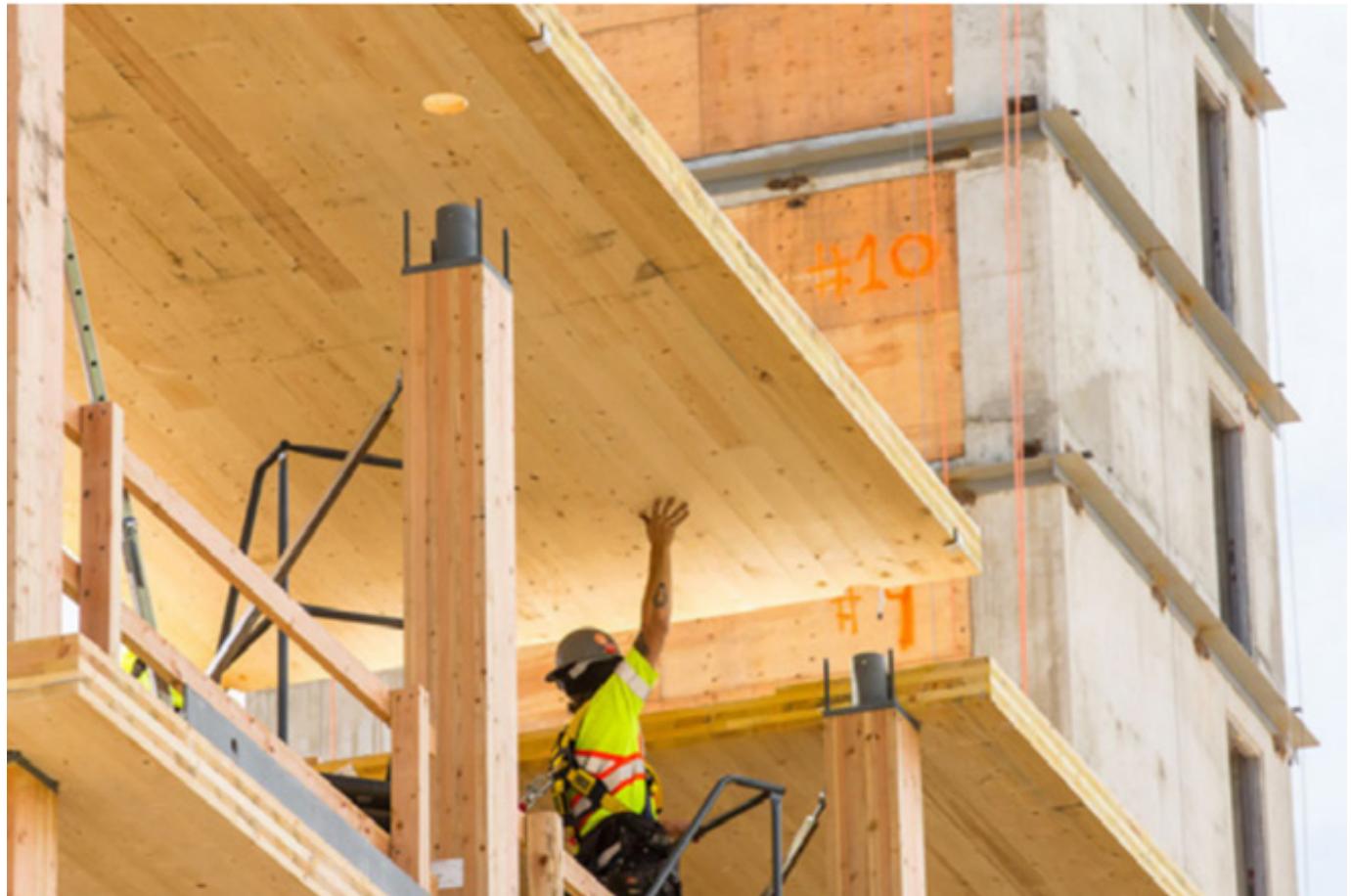


Figura 3.4 – Montaje de edificio Brock Commons, ejemplo de tipología poste-plataforma.
Fuente: <https://www.naturallywood.com/resources/nate-bergenon-installing-mass-tim>

3.3 MARCO ARRIOSTRADO (BRACED MASS TIMBER FRAME)

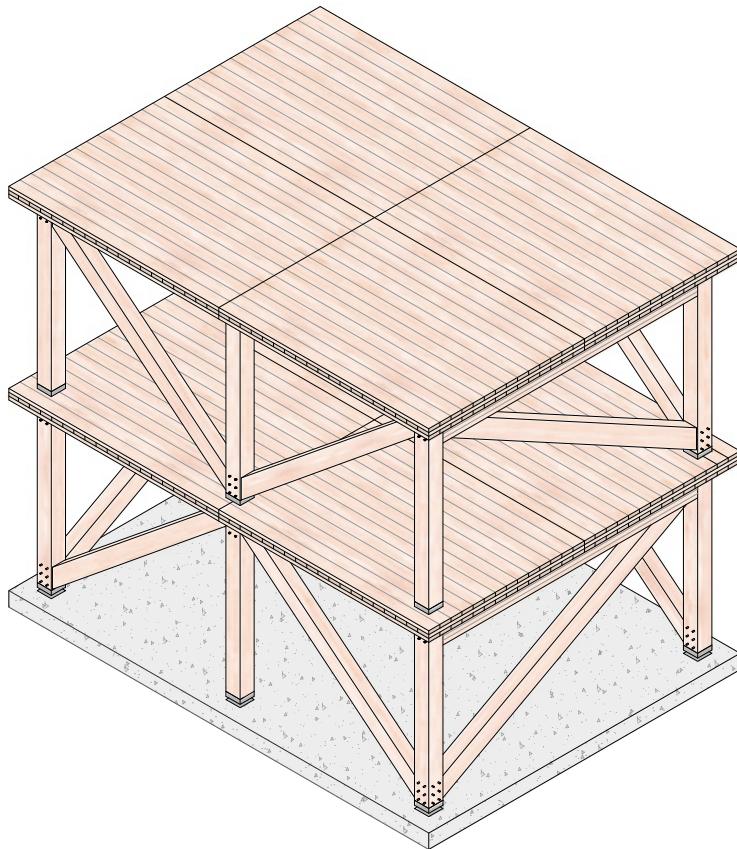


Figura 3.5 – Esquema de tipología marco arriostrado

Nacido naturalmente del poste-viga, el arriostramiento lateral mediante diagonales de madera y su amplio uso a nivel mundial, le da a esta solución la categoría de una nueva tipología constructiva. Básicamente se compone de la misma losa de CLT, vigas y columnas de MLE del poste-viga y se incluyen diagonales de MLE, responsables de resistir y traspasar las cargas laterales a las fundaciones.

En el diseño arquitectónico, la base de la tipología poste-viga le otorgan a esta tipología las mismas ventajas de grandes luces y adaptaciones de uso. No obstante, la incorporación de diagonales en el

interior puede interferir en la organización de los espacios y en las vistas hacia el exterior.

Desde el punto de vista estructural, el uso de diagonales aprovecha las propiedades más resistentes de la madera para transmitir las cargas laterales, utilizando su dirección más fuerte, paralela a las fibras, tanto en tensión como en compresión. Esto permite reducir la dependencia de muros de cortes, ejes rígidos o núcleos estructurales. Por otra parte, si bien el arriostramiento lateral permite relajar la resistencia a momento de la unión viga-columna, las conexiones entre las diagonales y el marco deben tener una capa-

ciudad elevada y al mismo tiempo dúctil, lo que puede ser un desafío y traducirse en conexiones relativamente costosas.

Por último, en la fase de construcción, esta tipología tiene características similares al montaje del

poste-viga. La principal diferencia es que, debido a las diagonales, hay más elementos y conexiones más complejas y, por ende, el tiempo de montaje puede ser mayor.



Figura 3.6 – Edificio Mjøstårnet, ejemplo tipología marco arriostrado
Photo: © Moelven.

3.4 PANELES DE MADERA MASIVA (MASS TIMBER PANELS)

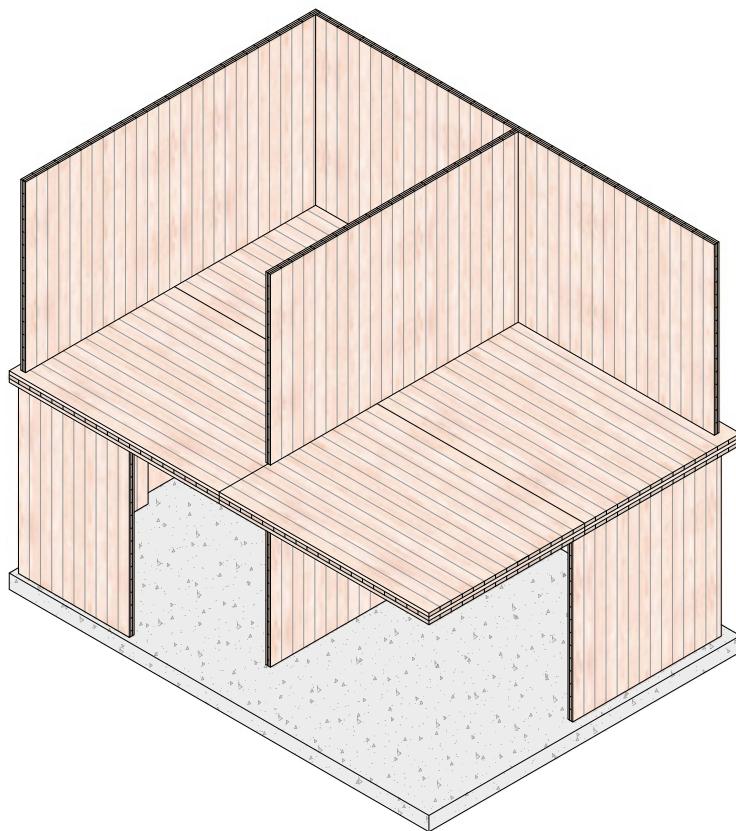


Figura 3.7 –Esquema de tipología paneles de madera masiva

A diferencia de las tipologías poste-viga, poste-plataforma y marco arriostrado, en que se utiliza el CLT únicamente como losa, la tipología de paneles de madera masiva los utiliza también como muros estructurales, consistiendo en esencia en un sistema estructural de muros en vez de marco.

Dentro de esta tipología, se distinguen dos variantes principales: **plataforma** y **balloon**, ambas derivadas del entramado ligero y adaptadas para maximizar las propiedades del CLT. Estas variantes se diferencian principalmente en la unión muro-losa de los paneles, la que le otorga características particulares. Cada uno presenta ventajas y desventajas específicas que los hacen más adecuados según las necesidades del proyecto.

El sistema plataforma se basa en la construcción por niveles, donde las losas horizontales se apoyan

directamente sobre las paredes o soportes del nivel inferior. Por su parte, el sistema *balloon* fue concebido para acelerar y optimizar la construcción en madera tradicional. Se caracteriza por el uso de paredes estructurales que se extienden de manera continua a lo largo de la altura del edificio, lo que permite una transmisión directa de las cargas y una mayor estabilidad lateral.

Esta tipología de paneles de madera masiva ofrece una gran libertad para el diseño arquitectónico, ya que permite utilizar paneles de distintas dimensiones para crear diversas espacialidades y expresiones arquitectónicas. Por otra parte, la estética del CLT ofrece la posibilidad de dejar los muros estructurales descubiertos, siempre y cuando se cumpla con los diversos requerimientos de desempeño frente a fuego, acústicos, entre otros.

Desde el punto de vista del diseño estructural, el CLT proporciona la rigidez y resistencia necesaria para responder eficientemente tanto a cargas verticales como horizontales. Lateralmente, el sistema de muros otorga una considerable rigidez y generalmente más uniforme en planta de lo que se puede lograr con núcleos rígidos en los sistemas estructurales de marco. Esto suele traducirse en mayor facilidad para cumplir los límites de deformaciones laterales. Por otra parte, existen múltiples variantes estructurales que pueden favorecer la disipación de energía, la industrialización o el montaje.

En la fase de construcción, la tipología de paneles de madera masiva aporta ventajas particulares frente a otras tipologías tratadas en este capítulo. Gracias a la prefabricación de estos elementos, los paneles suelen incluir soluciones integradas como aberturas para ventanas, puertas, sistemas eléctricos, sanitarios, entre otros. A diferencia de tipologías como el poste-plataforma o poste-viga, que requieren elementos adicionales de cerramiento y divisiones interiores, el CLT incorpora gran parte de estas funciones en un solo elemento, reduciendo tiempos y complejidad en obra. Una posible desventaja en comparación a las tipologías anteriores, es que suele requerir un uso más intensivo de madera, sin embargo, este puede ser compensado con el menor uso de materiales de mayor huella de carbono.

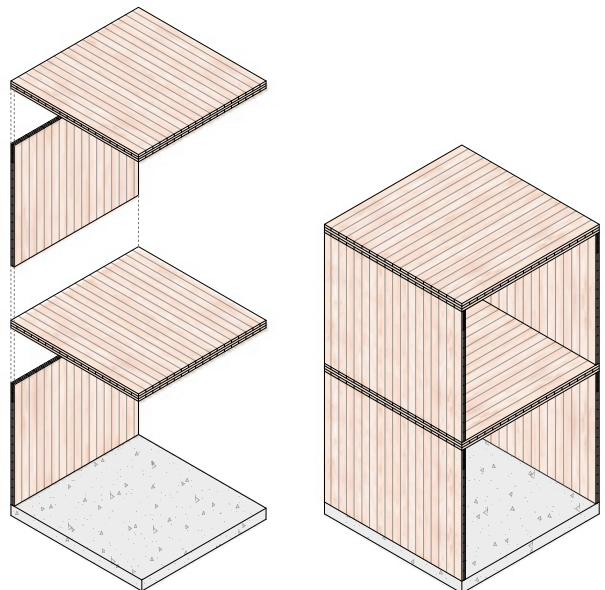


Figura 3.8 – Variante paneles de CLT en plataforma

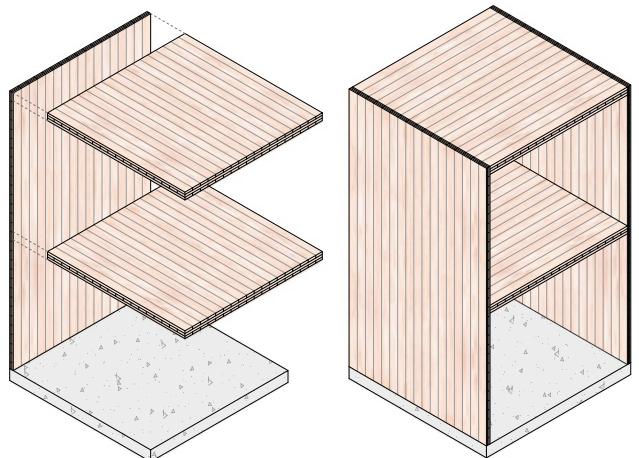


Figura 3.9 – Variante paneles de CLT en balloon



Figura 3.10 – Montaje de edificio Stadthaus, ejemplo de tipología paneles de madera masiva

Fuente: <https://waughthistleton.com/murray-grove/>

3.5 ESTRUCTURA LAMINAR O CÁSCARA (SHELL STRUCTURE)

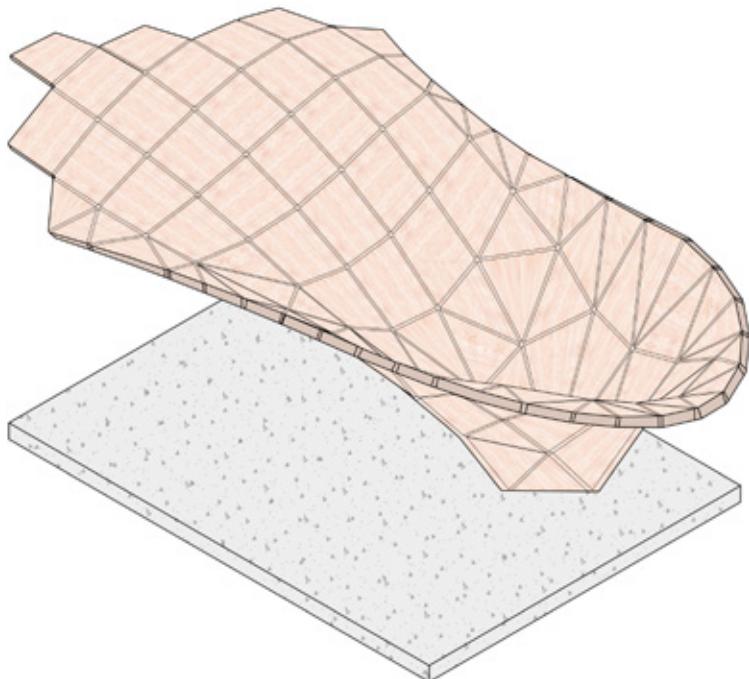


Figura 3.11 – Esquema de tipología estructura laminar

Una estructura laminar es un tipo de sistema estructural tridimensional cuya resistencia y estabilidad provienen principalmente de la geometría curva de su superficie continua, más que del espesor o masa del material. Estas estructuras trabajan de manera integrada, distribuyendo las cargas externas de forma eficiente mediante esfuerzos internos de tracción y compresión, buscando minimizar los esfuerzos de flexión. Estas estructuras son ideales para cubrir grandes luces con poco material, y se encuentran comúnmente en cúpulas, bóvedas, paraboloides hiperbólicos, y estructuras de doble curvatura.

Si bien se han construido diversas estructuras laminares en madera para lograr formas orgánicas, como las de los arquitectos Shigeru Ban o Jürgen Mayer, estas se han materializado gracias vigas curvas de MLE o LVL. En cambio, el uso de CLT en estructuras laminares actualmente tiene pocos

ejemplares e investigación, y ofrece una alternativa con miras al futuro.

Arquitectónicamente, las estructuras laminares de CLT se caracterizan por su capacidad para materializar geometrías complejas, como formas curvas y superficies continuas. La flexibilidad que proporciona este sistema facilita la creación de espacios distintivos, tales como cúpulas, bóvedas, entre otros. Sin embargo, debido a la complejidad de estas estructuras, el proceso requiere herramientas avanzadas de diseño computacional paramétrico y maquinarias de control numérico (CNC) especializada para realizar los cortes y ensambles precisos, según lo requiera el proyecto.

En cuanto al desempeño estructural, las estructuras laminares, destacan por su eficiencia en la transferencia de cargas mediante esfuerzos normales y cortantes en sus superficies por lo que tiende a ser

el sistema con un uso más eficiente del material. En el caso del CLT, las uniones entre los paneles tienen un rol importante, ya que son los encargados de entregarle la continuidad global a la estructura.

Desde el punto de vista constructivo, este sistema presenta ventajas gracias a su proceso de prefabricación. No obstante, dependiendo de la geometría del proyecto, cada segmento puede ser único, lo que requiere un control y organización específico durante la fabricación y montaje.

Actualmente, las estructuras laminares se encuentran en una etapa experimental y de investigación. El diseño y la construcción de este tipo de estructuras, con geometrías complejas y personalizadas, requiere un enfoque técnico especializado. A pesar de los desafíos, estas estructuras representan una evolución en la construcción con madera, permitiendo la exploración de nuevas posibilidades arquitectónicas en madera masiva.



Figura 3.12 – *Kaeng Krachan Elephant Park*, ejemplo de tipología estructura laminar
Photo: © Markus Schietsch Architekten

TABLA 3.2 – Cuadro resumen tipologías constructivas de madera masiva

Tipología Constructiva	Tradicional		Madera Masiva			
	Entramado Ligero	Poste viga (post and beam)	Poste plataforma (post and platform)	Marco arriostada (braced mass timber frame)	Paneles de madera masiva (mass timber panels)	Estructura laminar (shell structure)
Producto de Madera						
Altura edificación más común ¹	Baja Altura	✓	✗	✗	✗	✗
	Mediana Altura	✓	✓	✓	✓	✓
	Gran Altura	✗	✓	✓	✓	✗
Tiempo de Montaje	● ● ○ ○	● ● ● ○	● ● ● ●	● ● ○ ○	● ● ● ○	● ● ● ○
Facilidad de Trasporte	● ● ● ●	● ● ● ○	● ● ● ○	● ● ● ○	● ● ○ ○	● ● ○ ○
Flexibilidad de diseño	● ● ○ ○	● ● ● ○	● ○ ○ ○	● ● ● ○	● ● ● ●	● ● ● ●
Desmontaje	● ○ ○ ○	● ● ● ●	● ● ● ●	● ● ● ●	● ● ● ○	● ● ● ○
Luz Maxima	● ○ ○ ○	● ● ● ○	● ● ○ ○	● ● ● ○	● ● ○ ○	● ● ● ●

Nota 1: Las casillas con una ✗ no implican que no sea factible.



CAPÍTULO 4

DISEÑO ESTRUCTURAL DEL CLT

El siguiente capítulo representa un extracto del Capítulo 5 del Manual de Modelación Computacional y Diseño Estructural de Edificios de Madera Contralaminada (CLT) (Reyes et al., 2024) y se ha incluido en esta Guía de Diseño y Especificaciones sin modificaciones. El objetivo de esta guía es entregar la información y herramientas necesarias para orientar el diseño de los principales aspectos técnicos, incluido el diseño estructural. Para profundizar en este tema, consultar el Manual de Modelación mencionado.

Independiente del tipo de estructura o el material con el cual se construye, todo diseño estructural debe cumplir con la inecuación fundamental:

(4.1) *Solicitud de diseño \leq Capacidad de diseño*

Internamente, esta ecuación fundamental involucra básicamente tres aspectos: (i) caracterización de las propiedades elásticas y resistentes de los materiales (acero, madera, hormigón, albañilería, etc.); (ii) definición de las cargas y sus combinacio-

nes para el diseño; y (iii) definición o acuerdo de un nivel aceptable de seguridad, que sea de fácil y consistente aplicación para los calculistas. Estos tres aspectos tienen diferente tratamiento e interpretación dependiendo del método de cálculo estructural empleado, existiendo mundialmente dos grandes filosofías: el diseño por **tensiones admisibles** (ASD) y el diseño por **estados límites últimos** (ULS). A nivel internacional coexisten ambos enfoques, aunque hay una clara tendencia hacia el reemplazo del primero en favor del segundo, lo que ha dado nacimiento a una tercera filosofía de diseño que puede entenderse más bien como una conversión de ASD para trabajar como ULS, el llamado diseño por **resistencia última** (LRFD) (Guindos, 2019c).

Sin entrar en detalle sobre la teoría básica y su origen, para lo cual se recomienda revisar el libro Fundamentos del diseño y la construcción con madera (Guindos, 2019b, Capítulo 7), es importante saber cuál de estas filosofías se emplea en los principales países referentes de la construcción en madera masiva. Europa es sin duda el mayor referente para la construcción en madera masiva y desde la concepción de su código de diseño EN 1995-1-1, se basan en la filosofía ULS. Por otra parte, en Norteamérica históricamente se ha trabajado con la filosofía ASD, introduciéndose en el año 1984 la filosofía ULS en la normativa canadiense CSA O86³ y a partir de 1991 la filosofía LRFD en la normativa estadounidense NDS. Actualmente, en Europa se sigue empleando la filosofía ULS, en Canadá se retiró la filosofía ASD y se utiliza también ULS, mientras que en Estados Unidos se permiten las filosofías ASD y LRFD.

A la fecha de publicación de esta edición, en Chile se diseña toda estructura de madera con la norma NCh1198 y la filosofía ASD, a diferencia de las estructuras de hormigón armado y de acero⁴ que se diseñan según la filosofía LRFD, siguiendo la tendencia mundial.

3. Pese a ser en esencia lo mismo, la normativa canadiense CSA 086 utiliza la abreviación LSD (*limit states design*) para referirse al método de estados límites últimos.
4. La normativa de acero incluye la posibilidad de diseñar bajo un método “ASD”, aunque en rigor este método se derivó del LRFD y calibrándolo para obtener resultados equivalentes.

Para estar dentro del marco normativo actual, el presente manual emplea la filosofía ASD. Sin embargo, con miras a un futuro esperablemente no muy lejano, se trabaja con leves diferencias a la actual NCh1198 para una posible adopción de la filosofía LRFD. A continuación, se presentan las fórmulas y métodos de cálculo principales para el diseño estructural de paneles de CLT, de uniones y algunas verificaciones de serviciabilidad.

4.1 VERIFICACIÓN DE PANELES DE CLT

Desglosando la inecuación fundamental del cálculo estructural (4.1), comenzando por la parte derecha, la capacidad de un panel de CLT puede estar determinada según la caracterización en forma de **tensión admisible** o de **resistencia característica** (usualmente en unidades de tensiones [MPa]), lo cual constituye una diferencia elemental en la filosofía de diseño, correspondiéndose con ASD y ULS respectivamente. Dependiendo de la filosofía, se emplearán diferentes factores de modificación para obtener valores de diseño.

En este punto, es importante aclarar cómo se trabaja la capacidad de diseño en esta guía. A la

fecha de publicación de esta edición, el Instituto Nacional de Normalización de Chile está trabajando en la normativa de fabricación de paneles de CLT, la cual está basada principalmente en la normativa europea UNE-EN 16351:2021, que trabaja con resistencias características. Similar al camino que tomó la norma de propiedades físicas y mecánicas de la MLE, NCh2165-2023, la cual se basa en parte en normativa europea, para poder dialogar con la filosofía ASD de la NCh1198 se emplea un factor de conversión Ω para obtener valores de tensiones admisibles a partir de resistencias características⁵. Dicho esto, la capacidad de diseño para paneles de CLT se trabaja en este manual como una **tensión admisible de diseño**:

$$(4.2) \quad f_{d,ASD} = \frac{f_k}{\Omega} \times \prod_i k_i$$

en que:

f_k = resistencia característica

Ω = factor de conversión

$\prod_i k_i$ = producto de los factores de modificación aplicables

NOTA TÉCNICA 4.1 – Nomenclatura NCh1198 vs Manual

En este manual se ajusta levemente el símbolo utilizado para referirse a algunas propiedades por diversas razones:

- **Tensiones de diseño:** en la NCh1198 se utiliza el símbolo F , mientras que en este manual se utiliza el símbolo f . El propósito es referirse a valores de fuerza (por ejemplo, en [kN]) con letras mayúsculas y a valores de tensiones (por ejemplo, en [MPa]) con letras minúsculas. Esto se usa en la práctica para referirse a la capacidad de un panel de CLT, por ejemplo, cuando se reporta su capacidad como momento resistente R [kN·m] o como tensión f [MPa].
- **Tensiones internas:** en la NCh1198 se utiliza el símbolo f , mientras que en este manual se utiliza el símbolo σ o τ , de acuerdo con la nomenclatura más usada en la mecánica de sólidos.
- **Factores de modificación:** en la NCh1198 se utiliza el símbolo K , mientras que en este manual se utiliza el símbolo k . Esto es debido a que la letra mayúscula K se utiliza para referirse a rigidez.

5. Esta conversión puede entenderse como el paso inverso del método estadounidense para trabajar con la filosofía LRFD, quienes convierten las tensiones básicas a tensiones nominales con el factor K_F .

En cuanto a la parte izquierda de la inecuación (4.1), en la práctica profesional existen principalmente dos alternativas para determinar la solicitudación de diseño: mediante **modelos de elementos tipo viga** (usualmente cálculo analítico) o mediante **modelos de elementos tipo placa** (usualmente cálculo computacional). Para detalles de los distintos modelos existentes, se recomienda revisar el libro “Conceptos avanzados del diseño estructural con madera – Parte II” (Guindos, 2019a).

Habitualmente, los modelos de elementos tipo viga representan “franjas de 1 [m] de ancho”, así que no es extraño que la solicitudación de diseño se desglose como: un esfuerzo de diseño por unidad de ancho, usualmente en unidades de fuerza [kN/m] o momento [kN·m/m]; y un valor seccional, también por unidad de ancho, que permita obtener la tensión generada en [MPa] en el punto crítico de la sección transversal.

$$(4.3) \quad \text{Solicitudación} = \frac{\text{Esfuerzo por 1 [m] de ancho}}{\text{Valor seccional por 1 m de ancho}}$$

En las siguientes secciones se presentan valores de resistencia característica para cada esfuerzo, valores seccionales que permitirán obtener la tensión generada en el punto crítico, la verificación detallada con modelos de elementos tipo viga de cada uno de estos, y finalmente, las verificaciones que se deben hacer por combinaciones de esfuerzos.

Cabe mencionar que las verificaciones de las secciones 4.1.4 hasta 4.1.7 abarcan todos los posibles modos de falla de un panel de CLT, pese a que algunos sean muy poco frecuentes.

4.1.1 Resistencias características

En las próximas secciones el usuario podrá entender el trasfondo físico de los distintos modos de falla posibles en paneles de CLT, los cuales dependen de un valor de resistencia para cada caso. En ocasiones, esta viene dada directamente por las propiedades de resistencia de las láminas de madera aserrada con las cuales se confecciona el panel. No obstante, algunos fallos son propios del CLT como panel, por lo cual su resistencia no necesariamente es la misma que la de las tablas de madera que lo conforman. Incluso algunos modos de falla aún requieren mayor

estudio y validación experimental para proponer valores de resistencias consensuados, por lo que por seguridad se trabaja con algunas minoraciones a la espera de la normalización correspondiente.

La Tabla 4.1 presenta una propuesta de clases estructurales de CLT homogéneos (esto es, un CLT en donde todas las tablas tienen la misma clasificación estructural) con valores de resistencia característica y módulos de elasticidad, en que: las resistencias a flexión ($f_{f,k}$), compresión paralela ($f_{cp,k}$), tracción paralela ($f_{tp,k}$) y módulos de elasticidad (E_p) corresponden a láminas de clase estructural C conforme a UNE-EN 338; la resistencia a flexión en el plano ($f_{f,canto,k}$) corresponde a la resistencia a flexión $f_{f,k}$ reducida en un 15% por seguridad, mientras no se tengan más datos experimentales; la resistencia a cizalle longitudinal ($f_{cz,k}$) y tracción normal ($f_{tp,k}$) corresponden a valores independientes de la clase estructural conforme a NCh2165:2023; la resistencia al cizalle rodante ($f_{rod,k}$) y compresión normal ($f_{cn,k}$) corresponden a valores mínimos conforme a UNE – EN 16351:2021; y, por último, la resistencia al cizalle de la sección neta efectiva ($f_{v,k}$) corresponde al valor mínimo conforme a prEC5.

Adicionalmente, e independiente de la clase estructural, según UNE – EN 16351:2021 la resistencia de cizalle por torsión de la superficie encolada entre láminas adyacentes ortogonales $f_{cz,tor,k}$, se debe determinar para cada capa del panel mediante la expresión:

$$(4.4) \quad f_{cz,tor,k} = \frac{3}{2} \times f_{v,k} \times \left(\frac{t_{l,i}}{b_{l,i}} \right)$$

en que:

$f_{v,k}$ = resistencia característica de cizalle de la sección neta efectiva determinada según Tabla 4.1.

$t_{l,i}$ = espesor de la capa i en [mm]. Para las capas encoladas en dirección paralela a la fibra, $t_{l,i}$ debe ser la suma de los espesores de dichas capas encoladas paralelamente. Para la determinación de $t_{l,i}/b_{l,i}$, los espesores de las capas exteriores se deben duplicar.

$b_{l,i}$ = mínimo entre el ancho de las láminas, la distancia entre un canto de lámina y una ranura, y la distancia entre ranuras dentro de una lámina, en la capa i en [mm]. En ausencia de información específica puede tomarse igual a 80 [mm].

TABLA 4.1 – Propiedades de resistencia característica y módulos de elasticidad en [MPa] considerados en este manual para un CLT homogéneo (a la espera de la norma nacional en desarrollo)

Propiedad	Símbolo	Clases estructurales				
		CL-16h	CL-18h	CL-20h	CL-22h	CL-24h
Resistencia de flexión	fuera del plano	$f_{f,k}$	16	18	20	22
	en el plano ^{a)}	$f_{f,canto,k}$	13,6	15,3	17	18,7
Resistencia de cizalle	longitudinal	$f_{cz,k}$	3,5	3,5	3,5	3,5
	rodante	$f_{rod,k}$	0,7	0,7	0,7	0,7
Resistencia de compresión	de la sección neta efectiva	$f_{v,k}$	5,5	5,5	5,5	5,5
	en el plano	$f_{cp,k}$	17	18	19	20
Resistencia de tracción	fuera del plano	$f_{cn,k}$	3	3	3	3
	en el plano	$f_{tp,k}$	10	11	12	13
Módulo de elasticidad medio	fuera del plano	$f_{tn,k}$	0,5	0,5	0,5	0,5
	longitudinal	E_p	8 000	9 000	9 500	10 000
Módulo de corte medio	transversal ^{b)}	E_n	270	300	320	330
	longitudinal ^{c)}	G	500	560	590	630
	rodante ^{d)}	G_r	50	56	59	69

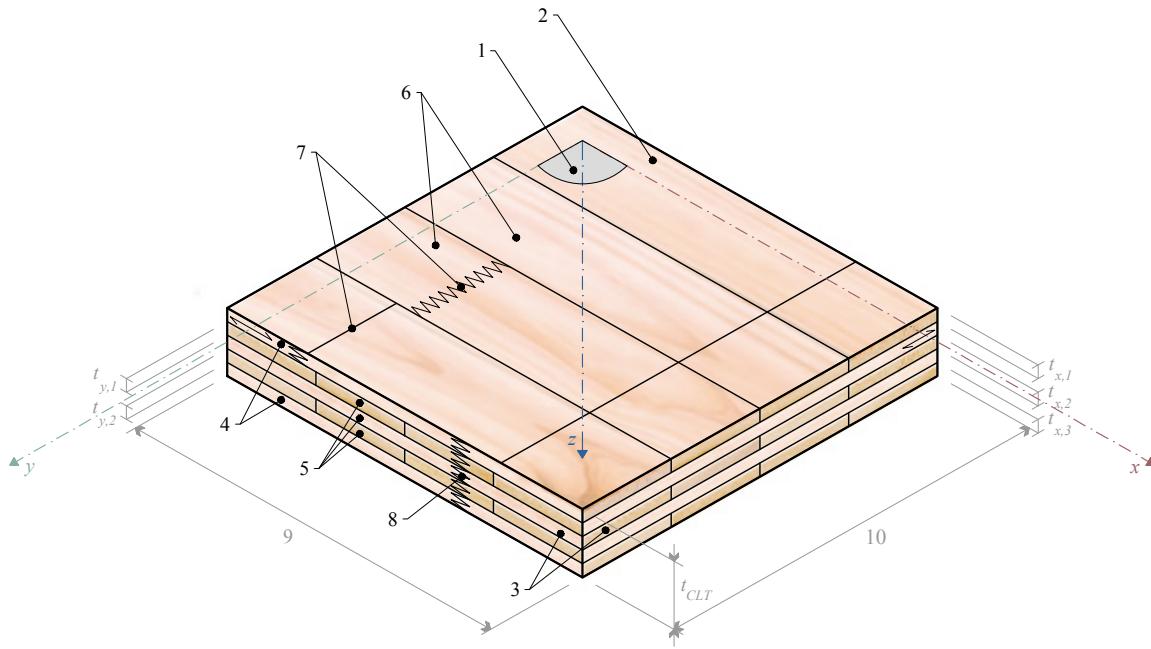
- a) La resistencia del CLT en flexión en su plano ($f_{f,canto,k}$) considera una reducción del 15% siguiendo recomendaciones de algunos estándares internacionales mientras no se tengan valores normalizados.
- b) El módulo de elasticidad en flexión perpendicular a la fibra puede estimarse como $E_n = E_p / 30$. De manera conservadora, puede asumirse $E_n = 0$.
- c) El módulo de corte paralelo a la fibra puede estimarse como $G = E_p / 16$.
- d) El módulo de corte perpendicular a la fibra puede estimarse como $G_r = G / 10$.

NOTA: Las clases estructurales se corresponden con paneles de CLT homogéneos armados con madera aserrada de clase estructural C conforme a EN 338.

4.1.2 Valores seccionales

La tridimensionalidad y ortotropía de un panel de CLT puede generar dificultades para identificar a cuál parte física del panel se está haciendo referencia, razón por lo cual es indispensable unificar un lenguaje común para referirse a cada una de ellas. La Figura 4.1 presenta las definiciones de las partes de un panel de CLT con las cuales se trabaja en este manual. Notar que la dimensión 9 indica

“generalmente el largo L del panel” y la dimensión 10 indica “generalmente el ancho b_{CLT} del panel”. Esto se debe a que en la práctica no siempre el eje x se corresponderá con el largo del panel, ya que es posible fabricar paneles en que la mayor dimensión es paralela a las láminas orientadas en y , por ejemplo, cuando se emplean muros monolíticos “acostados” en los que se quiere mantener mayor proporción de capas verticales.



- | | |
|--|---|
| 1. plano del elemento | 6. láminas (<i>laminations</i>) |
| 2. cara mayor (<i>wide face</i>) | 7. empalmes por unión dentada en una lámina |
| 3. caras menores o bordes (<i>narrow face</i>) | 8. empalme por unión macrodentada |
| 4. capas exteriores (<i>outer layers</i>) | 9. generalmente el largo L del panel |
| 5. capas interiores (<i>inner layers</i>) | 10. generalmente el ancho b_{CLT} del panel |

- x eje paralelo a la dirección de la fibra de las capas exteriores
 y eje perpendicular a la dirección de la fibra de las capas exteriores
 t_{CLT} espesor del panel de CLT
 $t_{x,i}$ espesor de la capa i con láminas en la dirección x
 $t_{y,i}$ espesor de la capa i con láminas en la dirección y

Figura 4.1 - Definiciones de partes de un panel de CLT (basado en UNE – EN 16351:2021).

Todos los valores seccionales se determinan para los ejes x e y por separado, además de considerar para ciertos valores seccionales un módulo de elasticidad de referencia E_r como el mayor módulo de elasticidad de las capas consideradas en cada dirección.

4.1.2.1 Valor seccional bruto, neto y efectivo

Previo a la determinación de los distintos valores seccionales, es necesario entender la diferenciación entre valor bruto, valor neto y valor efectivo en este manual, ya que en la literatura y en los

códigos normativos suele ser confuso cuáles capas se están considerando en el cálculo:

- **Valor seccional bruto:** Valor seccional que omite la diferencia de rigidez entre capas.
- **Valor seccional neto:** Valor seccional que desprecia el aporte de capas perpendiculares.
- **Valor seccional efectivo:** Valor seccional que considera una ponderación de rigideces⁶.

6. Útil en paneles de CLT combinados en donde no todas las tablas tienen la misma clasificación o grado estructural (ver Nota técnica 4.2).

Las últimas dos definiciones se pueden y suelen combinar, es decir un **valor seccional neto efectivo**, que quiere decir que se desprecian las capas perpendiculares y se considera una ponderación de rigideces de las capas longitudinales. Notar que, en los casos más comunes, cuando todas las capas longitudinales son del mismo grado o clase estructural, ocurre que *neto=neto efectivo*.

En las siguientes secciones se utilizan los subíndices *net* para referirse a un valor neto efectivo y *ef* para referirse a un valor efectivo.

4.1.2.2 Área neta efectiva

Para las verificaciones de tensiones axiales puras, es decir, las tensiones producto de compresión en el plano o tracción en el plano, se desprecia la rigidez de las capas perpendiculares a la solicitación, en tanto las capas paralelas a la solicitud se pueden asimilar a un sistema de resortes en paralelo en el cual la fuerza se reparte según rigidez axial. El valor seccional para estas verificaciones corresponde al área neta efectiva A_{net} , que se determina mediante la expresión (4.5).

CARA MENOR O BORDE *x*

$$(4.5) \quad A_{net,x} = \sum_i^{n_x} \frac{E_i}{E_{r,x}} \cdot b \cdot t_i$$

CARA MENOR O BORDE *y*

$$A_{net,y} = \sum_i^{n_y} \frac{E_i}{E_{r,y}} \cdot b \cdot t_i$$

en que:

- n_x = representa las capas en la dirección *x*
- n_y = representa las capas en la dirección *y*
- E_i = módulo de elasticidad de la capa *i*
- $E_{r,x}$ = módulo de elasticidad de referencia de las capas en *x*
- $E_{r,y}$ = módulo de elasticidad de referencia de las capas en *y*
- b = ancho del elemento tipo viga, usualmente 1 [m]
- t_i = espesor de la capa *i*

NOTA TÉCNICA 4.2 – Ponderación por módulo elástico – Valor neto efectivo

El hecho de que el área neta efectiva está ponderada por el módulo elástico permite contemplar situaciones especiales en la que no todas las láminas resistentes tienen la misma rigidez.

Por ejemplo, en un panel de 5 capas en que la primera y última capa son grado C24 y las restantes son grado C16, el área neta en la cara menor *x* se calcula como:

$$A_{net,x} = \frac{E_{C24}}{E_{C24}} \cdot b \cdot t_1 + \frac{E_{C16}}{E_{C24}} \cdot b \cdot t_3 + \frac{E_{C24}}{E_{C24}} \cdot b \cdot t_5$$

4.1.2.3 Centro de gravedad y distancia al centro de gravedad de cada capa

Conocer el centro de gravedad de la sección transversal z_{cg} y la distancia entre este último y el centro de gravedad de cada capa individual z_i en un panel de CLT, es necesario para determinar ciertos valores tensionales y rigideces.

Normalmente, el CLT es simétrico en espesor y rigidez de láminas, por lo que el centro de gravedad coincide con el centro de simetría para ambas direcciones ($z_{cg,x} = z_{cg,y} = t_{CLT}/2$). Sin embargo, en caso de que no fuese simétrico o bien por exposición al fuego en alguna de sus caras, el centro de gravedad puede variar su posición, en cuyo caso podría determinarse mediante la expresión (4.6). En este caso, es común despreciar el aporte de las capas perpendiculares a la solicitación, especialmente en el cálculo manual.

CARA MENOR O BORDE x

$$(4.6) \quad z_{cg,x} = \frac{\sum_{i=1}^{n_x} \left(\frac{E_i}{E_{r,x}} \cdot b \cdot t_i \cdot o_i \right)}{\sum_{i=1}^{n_x} \left(\frac{E_i}{E_{r,x}} \cdot b \cdot t_i \right)}$$

CARA MENOR O BORDE y

$$z_{cg,y} = \frac{\sum_{i=1}^{n_y} \left(\frac{E_i}{E_{r,y}} \cdot b \cdot t_i \cdot o_i \right)}{\sum_{i=1}^{n_y} \left(\frac{E_i}{E_{r,y}} \cdot b \cdot t_i \right)}$$

en que:

o_i = posición del centro de gravedad de cada capa i respecto de la cara superior

Luego, en conocimiento del centro de gravedad, la distancia entre este y el centro de gravedad de cada capa puede determinarse mediante la expresión (4.7).

CARA MENOR O BORDE x

$$(4.7) \quad z_{i,x} = |o_i - z_{cg,x}|$$

CARA MENOR O BORDE y

$$z_{i,y} = |o_i - z_{cg,y}|$$

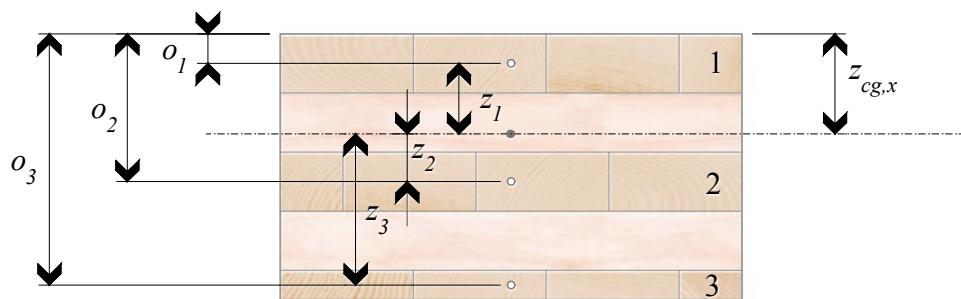


Figura 4.2 - Ejemplo de determinación de las distancias $z_{i,x}$ en la cara menor x .

4.1.2.4 Momento de inercia, módulo de flexión y radio de giro

Si bien es una práctica aceptada determinar el módulo de flexión neto efectivo W_{net} , es decir, despreciando las capas perpendiculares, ambas normativas norteamericanas (NDS y CSA) optaron por trabajar con un módulo de flexión efectivo W_{ef} determinado a partir del modelo de analogía de corte⁷. De este modo, el momento de inercia efectivo se determina según la expresión

CARA MENOR O BORDE x

$$(4.8) \quad I_{ef,x} = \frac{(EI)_{ef,x}}{E_{r,x}}$$

CARA MENOR O BORDE y

$$I_{ef,y} = \frac{(EI)_{ef,y}}{E_{r,y}}$$

en que:

$(EI)_{ef,x}$	= rigidez efectiva a flexión para el eje x según el método de analogía de corte (ver 4.1.2.7)
$(EI)_{ef,y}$	= rigidez efectiva a flexión para el eje y según el método de analogía de corte (ver 4.1.2.7)
$E_{r,x}$	= módulo de elasticidad de referencia de las capas en x
$E_{r,y}$	= módulo de elasticidad de referencia de las capas en y

Luego, resulta directo determinar el módulo de flexión efectivo en el punto más alejado del eje neutro mediante la expresión (4.9).

CARA MENOR O BORDE x

$$(4.9) \quad W_{ef,x} = \frac{I_{ef,x}}{z_{max,x}}$$

CARA MENOR O BORDE y

$$W_{ef,y} = \frac{I_{ef,y}}{z_{max,y}}$$

en que:

$z_{max,x}$ = máxima distancia entre el centro de gravedad de la sección y el punto más alejado en las capas orientadas en x
Para un CLT simétrico $z_{max,x}=t_{CLT}/2$

$z_{max,y}$ = máxima distancia entre el centro de gravedad de la sección y el punto más alejado en las capas orientadas en y .
Para un CLT simétrico $z_{max,y}=t_{CLT}/2-t_{x,1}$

Por otra parte, para algunas verificaciones de inestabilidad es necesario calcular el radio de giro, el cual se recomienda determinar empleando el área neta y el momento de inercia efectivo, mediante la expresión (4.10).

CARA MENOR O BORDE x

$$(4.10) \quad i_{ef,x} = \sqrt{\frac{I_{ef,x}}{A_{net,x}}}$$

CARA MENOR O BORDE y

$$i_{ef,y} = \sqrt{\frac{I_{ef,y}}{A_{net,y}}}$$

7. La NDS y CSA emplean la nomenclatura S_{eff} para referirse el módulo de flexión efectivo.

Notar que, si bien el radio de giro efectivo se denomina según la cara menor que se está mirando, la rotación es entorno al eje opuesto. Es decir, el pandeo de un panel entorno al eje y depende del radio de giro $i_{ef,x}$ (ver Figura 4.1).

4.1.2.5 Momento estático

Cuando se aplica un cortante fuera del plano del CLT, es posible que las láminas transversales fallen por rodadura o bien que las láminas paralelas fallen por cizalle longitudinal. Debido a esto, es necesario determinar el momento estático neto efectivo para ambos casos mediante las expresiones (5.11) y (5.12).

CARA MENOR O BORDE x	CARA MENOR O BORDE y
$(4.11) \quad S_{rod,net,x} = \sum_{i=1}^{n_{sx}} \frac{E_i}{E_{r,x}} \cdot b \cdot t_i \cdot z_{i,x}$	$S_{rod,net,y} = \sum_{i=1}^{n_{sy}} \frac{E_i}{E_{r,y}} \cdot b \cdot t_i \cdot z_{i,y}$
$(4.12) \quad S_{cz,net,x} = S_{rod,net,x} + \frac{E_{c,x}}{E_{r,x}} \cdot b \cdot \frac{t_c^2}{8}$	$S_{cz,net,y} = S_{rod,net,y} + \frac{E_{c,y}}{E_{r,y}} \cdot b \cdot \frac{t_c^2}{8}$

en que:

- n_{sx} = representa la mitad superior (o inferior) de las capas en la dirección x sin considerar la capa central (en caso de que fuese orientada en x)
- n_{sy} = representa la mitad superior (o inferior) de las capas en la dirección y sin considerar la capa central (en caso de que fuese orientada en y)
- $E_{c,x}$ = módulo de elasticidad de la capa central si está orientada en x
- $E_{c,y}$ = módulo de elasticidad de la capa central si está orientada en y
- t_c = espesor de la capa central

Notar que si la capa central fuese transversal a la cara que se está analizando, como ocurre en la cara menor x de un panel de 3 capas, se obtiene que $S_{cz,net,x} = S_{rod,net,x}$.

Entender la razón de estos dos módulos estáticos y el punto en el cual se están determinando, viene de la mano con entender la distribución de tensiones de corte en un panel cargado fuera del plano y qué supuestos se realizan. Esto se explica en la sección 4.1.5.

4.1.2.6 Módulo de torsión

Para las verificaciones de tensiones generadas por momentos torsores, se debe determinar el módulo de torsión. Para ello, se recomienda emplear la fórmula especificada en el prEC5⁸ mediante la expresión (4.13), la cual considera el módulo de torsión bruto, considerando el ancho real de la sección, es decir $b=b_{CLT}$ o $b=L$, según la cara menor que se esté analizando.

$$(4.13) \quad J = \frac{t_{CLT}^3 \cdot b}{3} \cdot \left(1 - 0,63 \cdot \frac{t_{CLT}}{b}\right)$$

8. En el prEC5 se emplea la nomenclatura I_x para referirse al módulo de torsión.

4.1.2.7 Modelo de analogía de corte

Tal como se mencionó anteriormente, las normativas norteamericanas optaron por determinar el módulo de flexión W_{ef} a partir de la rigidez efectiva del modelo de analogía de corte. Alternativa que se sugiere también en este manual.

Las expresiones indicadas en este apartado corresponden a aquellas especificadas en la normativa canadiense CSA y aplican únicamente a las propiedades de paneles de CLT con capas ortogonales alternadas. Las propiedades de paneles de CLT con capas adyacentes orientadas en la misma dirección bien pueden ser facilitadas por el fabricante del producto o determinarse con otro modelo de cálculo tipo viga, sugiriéndose el método gamma (FPI Innovations, 2019).

La rigidez efectiva a flexión $(EI)_{ef,x}$ y la rigidez efectiva a corte $(GA)_{ef,x}$ para la cara menor o borde x (eje fuerte) se determinan mediante las expresiones (5.14) y (5.15), respectivamente (ver Figura 4.3).

$$(4.14) \quad (EI)_{ef,x} = \sum_{i=1}^n E_i \cdot \frac{b \cdot t_i^3}{12} + \sum_{i=1}^n E_i \cdot b \cdot t_i \cdot z_{i,x}^2$$

$$(4.15) \quad (GA)_{ef,x} = \frac{\left(t_{CLT} - \frac{t_1}{2} - \frac{t_n}{2} \right)^2}{\left(\frac{t_1}{2 \cdot G_1 \cdot b} \right) + \left(\sum_{i=2}^{n-1} \frac{t_i}{G_i \cdot b} \right) + \left(\frac{t_n}{2 \cdot G_n \cdot b} \right)}$$

en que:

$(EI)_{ef,x}$	=	rigidez efectiva a flexión, en $[N \cdot mm^2]$
$(GA)_{ef,x}$	=	rigidez efectiva a corte, en $[N]$
n	=	número de capas en el panel de CLT
E_i	=	módulo de elasticidad de la capa i , en $[MPa]$
	=	E_p , para las capas orientadas en x , en $[MPa]$
	=	$E_{n'}$, para las capas orientadas en y , en $[MPa]$
G_i	=	módulo de corte de la capa i , en $[MPa]$
	=	G , para las capas orientadas en x , en $[MPa]$
	=	G_r , para las capas orientadas en y , en $[MPa]$
t_i	=	espesor de la capa i , en $[mm]$
$z_{i,x}$	=	distancia desde el centro de la capa i al eje neutro del panel de CLT, en $[mm]$
b	=	ancho del elemento tipo viga, usualmente 1.000 $[mm]$
t_{CLT}	=	espesor del panel de CLT, en $[mm]$

Notar que la sumatoria de la rigidez efectiva $(EI)_{ef,x}$ va desde $i=1$ hasta n , es decir, considera todas las capas. Los valores E_n y G_r podrían asumirse nulos, sin embargo, en la práctica se estiman como $E_n=E_p/30$ y $G_r=G/10$.

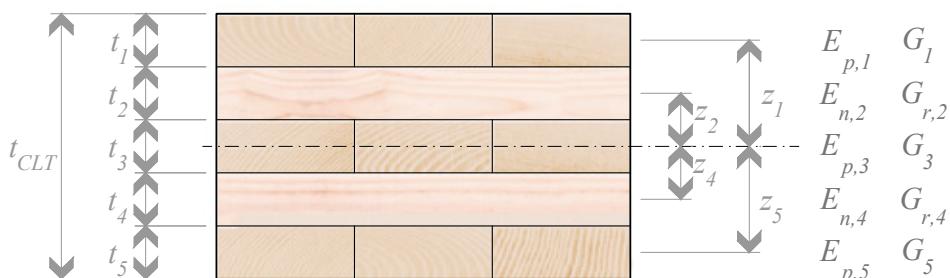


Figura 4.3 - Ejemplo de propiedades de las capas para la cara menor x (eje fuerte).

Por otra parte, la rigidez efectiva a flexión ($EI_{ef,y}$) y la rigidez efectiva a corte ($GA_{ef,y}$) para la cara menor o borde y (eje débil) se determinan mediante las expresiones (5.16) y (5.17) respectivamente.

$$(4.16) \quad (EI)_{ef,y} = \sum_{i=2}^{n-1} E_i \cdot \frac{b \cdot t_i^3}{12} + \sum_{i=2}^{n-1} E_i \cdot b \cdot t_i \cdot z_{i,y}^2$$

$$(4.17) \quad (GA)_{ef,y} = \frac{\left(t_{CLT} - \frac{t_1}{2} - \frac{t_n}{2} \right)^2}{\left(\frac{t_1}{2 \cdot G_1 \cdot b} \right) + \left(\sum_{i=2}^{n-1} \frac{t_i}{G_i \cdot b} \right) + \left(\frac{t_n}{2 \cdot G_n \cdot b} \right)}$$

en que:

$(EI)_{ef,y}$	=	rigidez efectiva a flexión, en [N·mm ²]
$(GA)_{ef,y}$	=	rigidez efectiva a corte, en [N]
n	=	número de capas en el panel de CLT
E_i	=	módulo de elasticidad de la capa i , en [MPa]
	=	E_n , para las capas orientadas en x , en [MPa]
	=	E_p , para las capas orientadas en y , en [MPa]
G_i	=	módulo de corte de la capa i , en [MPa]
	=	G_r , para las capas orientadas en x , en [MPa]
	=	G , para las capas orientadas en y , en [MPa]
t_i	=	espesor de la capa i , en [mm]
$z_{i,y}$	=	distancia desde el centro de la capa i al eje neutro del panel de CLT, en [mm]
b	=	ancho del elemento tipo viga, usualmente 1.000 [mm]
t_{CLT}	=	espesor del panel de CLT, en [mm]

A diferencia de la sumatoria de la rigidez efectiva del eje fuerte, la sumatoria para el eje débil ($EI_{ef,y}$) va desde $i = 2$ hasta $n - 1$, es decir, excluye las capas externas (que siempre estarán orientadas en x). No así el cálculo de la rigidez al corte ($GA_{ef,y}$), que sí considera todas las capas. De hecho, la fórmula es la misma que para $(GA)_{ef,x}$ y el resultado difiere por los valores G_i que toma cada capa (comparar Figura 4.3 con Figura 4.4).

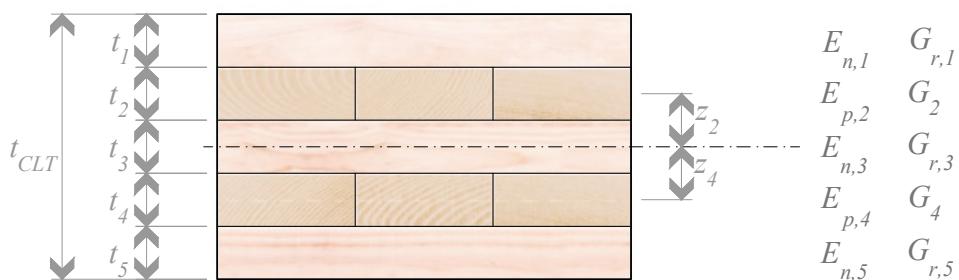


Figura 4.4 - Ejemplo de propiedades de las capas para la cara menor y (eje débil).

4.1.3 Factores de modificación generales

Al igual que cualquier producto de madera aserrada, se deben aplicar los factores de modificación generales indicados en la NCh1198 para determinar todas las tensiones de diseño, con la sola excepción del factor k_D para la compresión normal.

k_D =factor de modificación por duración de la carga según NCh1198

k_H =factor de modificación por contenido de humedad según NCh1198

k_T =factor de modificación por temperatura según NCh1198

4.1.3.1 Factor de modificación por ancho reducido, $k_{red,b}$

Tal como se mencionó al comienzo de la sección 4.1, la futura normativa de fabricación de paneles de CLT en Chile está basada en la norma europea UNE – EN 16351:2021, la cual estandariza ciertas dimensiones para determinar las resistencias características mediante ensayos de probetas de dimensiones estructurales. Debido a esto, en el caso de paneles de CLT cargados fuera del plano, que tengan un ancho b_{CLT} menor a 600 [mm], el prEC5 aplica

un factor de modificación por ancho reducido $k_{red,b}$ según la ecuación (4.18).

$$(4.18) \quad k_{red,b} = \frac{b_{CLT}}{1200} + 0,5$$

Este factor se aplica a las resistencias características de flexión fuera del plano $f_{f,k}$, compresión en el plano $f_{cp,k}$ y tracción en el plano $f_{tp,k}$, de paneles de CLT cargados fuera del plano.

4.1.4 Flexión

4.1.4.1 Flexión fuera del plano

Cuando un panel de CLT es cargado en su cara mayor de manera tal que se genera un momento flector (por ejemplo, losas cargadas gravitacionalmente o muros sometidos a viento perpendicular), se dice que está sometido a flexión fuera del plano por los momentos flectores m_{xy} y/o m_{yx} de la Figura 4.5, los cuales generan las distribuciones de tensiones $\sigma_{f,x}$ y $\sigma_{f,y}$, respectivamente. Debido a su ortotropía por la configuración de láminas cruzadas, la distribución de tensiones en la sección transversal es distinta a la distribución lineal en madera aserrada o vigas de MLE, ya que esta depende del módulo de elasticidad de cada capa.

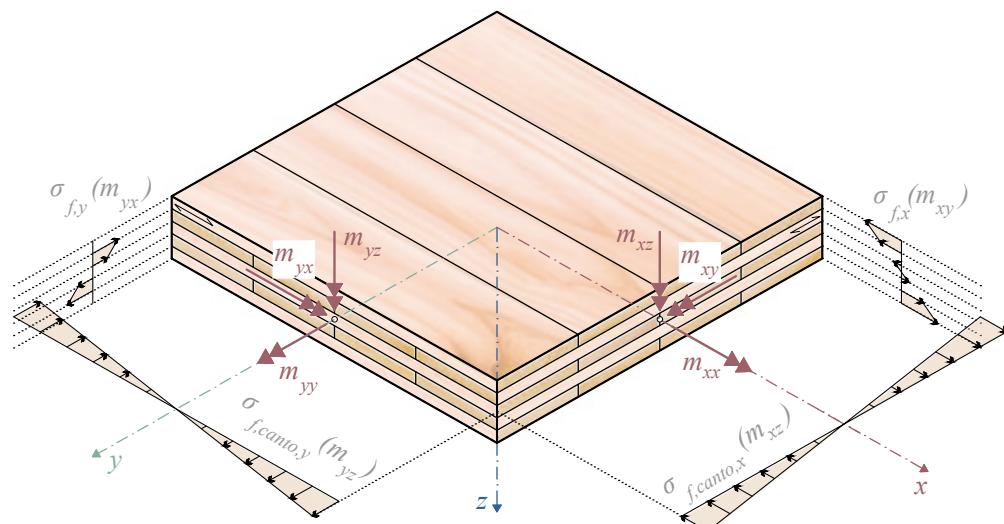


Figura 4.5 - Tensiones debidas a solicitudes de flexión.

La nomenclatura con letras minúsculas para los esfuerzos se emplea para implícitamente indicar que está normalizado por 1 [m] de ancho (recordar ecuación (4.3) y que todos los valores seccionales se suelen determinar con $b=1$ [m]).

Al igual que cualquier cuerpo sólido, la máxima tensión ocurre en el punto más alejado del eje neutro (ver Figura 4.5), razón por la cual el módulo de flexión se determina con z_{max} . Es importante mencionar que en paneles que no sean simétricos, el módulo de flexión W_{ef} se determinaría para la zona flexo-traccionada y para la zona flexo-comprimida por separado, dado que la distancia z sería diferente. Sin embargo, evaluar las tensiones con el módulo de flexión determinado con z_{max} es conservador.

La tensión por flexión fuera del plano en la capa crítica de cada cara menor o borde se determina mediante la expresión (4.19).

CARA MENOR O BORDE x

$$(4.19) \quad \sigma_{f,x} = \frac{m_{xy}}{W_{ef,x}}$$

CARA MENOR O BORDE y

$$\sigma_{f,y} = \frac{m_{yx}}{W_{ef,y}}$$

Por otra parte, la tensión de diseño en flexión fuera del plano se determina según las ecuaciones (4.20) y (4.21) para la zona flexo-traccionada y la zona flexo-comprimida respectivamente.

CARA MENOR O BORDE x

$$(4.20) \quad f_{ft,d,x} = \frac{f_{f,k,x}}{\Omega} \cdot k_D \cdot k_H \cdot k_T \cdot k_{red,b}$$

$$(4.21) \quad f_{fv,d,x} = \frac{f_{f,k,x}}{\Omega} \cdot k_D \cdot k_H \cdot k_T \cdot k_{red,b} \cdot k_{\lambda V}$$

CARA MENOR O BORDE y

$$f_{ft,d,y} = \frac{f_{f,k,y}}{\Omega} \cdot k_D \cdot k_H \cdot k_T \cdot k_{red,b}$$

$$f_{fv,d,y} = \frac{f_{f,k,y}}{\Omega} \cdot k_D \cdot k_H \cdot k_T \cdot k_{red,b} \cdot k_{\lambda V}$$

en que:

$$\Omega = 2,54$$

$f_{f,k,x}$ = resistencia característica a la flexión de la capa más externa en x

$f_{f,k,y}$ = resistencia característica a la flexión de la capa más externa en y

$k_{red,b}$ = factor de modificación por ancho reducido, determinado según 4.1.3.1

$k_{\lambda V}$ = factor de modificación por volcamiento según 4.1.4.3

Luego, la verificación estructural implica que la solicitudación de flexión debe ser menor a la capacidad del panel, según las expresiones (4.22) y (4.23).

CARA MENOR O BORDE x

$$(4.22) \quad \sigma_{f,x} \leq f_{ft,d,x}$$

CARA MENOR O BORDE y

$$\sigma_{f,y} \leq f_{ft,d,y}$$

$$(4.23) \quad \sigma_{f,x} \leq f_{fv,d,x}$$

$$\sigma_{f,y} \leq f_{fv,d,y}$$

4.1.4.2 Flexión en el plano (flexión de canto)

Cuando un panel de CLT es cargado en una de sus caras menores de manera tal que se genera un momento flector (por ejemplo, vigas cargadas gravitacionalmente), se dice que está sometido a flexión en el plano o flexión de canto por los momentos flectores m_{xz} y/o m_{yz} de la Figura 4.5, los cuales generan las distribuciones de tensiones $\sigma_{f,canto,x}$ y $\sigma_{f,canto,y}$, respectivamente.

En este caso, se recomienda determinar el módulo de flexión neto efectivo, asumiendo que las láminas transversales a la cara menor que se analiza no contribuyen. Dicho esto, el momento de inercia neto efectivo de canto se determina mediante la expresión (4.24).

CARA MENOR O BORDE x

$$(4.24) \quad I_{net,canto,x} = \sum_{i=1}^{n_x} \frac{E_i}{E_{r,x}} \cdot \frac{t_i \cdot b^3}{12}$$

CARA MENOR O BORDE y

$$I_{net,canto,y} = \sum_{i=1}^{n_y} \frac{E_i}{E_{r,y}} \cdot \frac{t_i \cdot b^3}{12}$$

Luego, se determina el módulo de flexión de canto neto efectivo en el punto más alejado del eje neutro mediante la expresión (4.25).

CARA MENOR O BORDE x

$$(4.25) \quad W_{net,canto,x} = \frac{I_{net,canto,x}}{b/2}$$

CARA MENOR O BORDE y

$$W_{net,canto,y} = \frac{I_{net,canto,y}}{b/2}$$

Entonces, la tensión por flexión fuera del plano en la capa crítica de cada dirección se determina mediante la expresión (4.26).

CARA MENOR O BORDE x

$$(4.26) \quad \sigma_{f,canto,x} = \frac{m_{xz}}{W_{net,canto,x}}$$

CARA MENOR O BORDE y

$$\sigma_{f,canto,y} = \frac{m_{yz}}{W_{net,canto,y}}$$

Por otra parte, la tensión de diseño en flexión en el plano se determina según las ecuaciones (4.27) y (4.28) para la zona flexo-traccionada y la zona flexo-comprimida respectivamente.

CARA MENOR O BORDE x

$$(4.27) \quad f_{ft,canto,d,x} = \frac{f_{f,canto,k,x}}{\Omega} \times k_D \times k_H \times k_T$$

CARA MENOR O BORDE y

$$f_{ft,canto,d,y} = \frac{f_{f,canto,k,y}}{\Omega} \times k_D \times k_H \times k_T$$

$$(4.28) \quad f_{fv,canto,d,x} = \frac{f_{f,canto,k,x}}{\Omega} \times k_D \times k_H \times k_T \times k_{\lambda V}$$

$$f_{fv,canto,d,y} = \frac{f_{f,canto,k,y}}{\Omega} \times k_D \times k_H \times k_T \times k_{\lambda V}$$

en que:

$$\Omega = 2,54$$

$f_{f,canto,k,x}$ = resistencia característica a la flexión de canto de las capas en x . Siguiendo algunos estándares internacionales, en este manual se considera una reducción de un 15% respecto de la tensión admisible fuera del plano, mientras no se cuente con valores normados

$f_{f,canto,k,y}$ = resistencia característica a la flexión de canto de las capas en y . También se considera una reducción de un 15%

Luego, la verificación estructural implica que la solicitudación de flexión debe ser menor a la capacidad del panel, según las expresiones (4.29) y (4.30).

CARA MENOR O BORDE x

$$(4.29) \quad \sigma_{f,canto,x} \leq f_{ft,canto,d,x}$$

CARA MENOR O BORDE y

$$\sigma_{f,canto,y} \leq f_{ft,canto,d,y}$$

$$(4.30) \quad \sigma_{f,canto,x} \leq f_{fv,canto,d,x}$$

$$\sigma_{f,canto,y} \leq f_{fv,canto,d,y}$$

4.1.4.3 Factor de modificación por volcamiento, $k_{\lambda V}$

La NDS indica que la determinación del factor de modificación por volcamiento para paneles de CLT se calcula de la misma forma que para otros productos de madera. Convenientemente para Chile, la determinación de este factor en la NCh1198 está basada en la normativa estadounidense, por lo que se sugiere aplicar las disposiciones de la norma nacional con ciertos ajustes para el CLT.

Por lo tanto, se considera que los paneles de CLT solicitados en flexión, que no tienen apoyos laterales a lo largo de su luz, son susceptibles a un vuelco lateral torsional si es que su relación de aspecto

entre altura y ancho es mayor a 2. Es decir, se debe calcular el factor $k_{\lambda V}$ cuando:

- a) $t_{CLT}/b_{CLT} > 2$ para paneles sometidos a flexión fuera del plano, lo cual es sumamente raro; y
- b) $b_{CLT}/t_{CLT} > 2$ para paneles sometidos a flexión en el plano, lo cual es mucho más probable. Por ejemplo, en vigas (ver Figura 4.6)

En estas situaciones, el factor de modificación por volcamiento, $k_{\lambda V}$ se calcula en función de la esbeltez de volcamiento (λ_v o $\lambda_{V,canto}$ según sea el caso) de acuerdo con la siguiente expresión:

$$(4.31) \quad k_{\lambda V} = \frac{1 + \frac{f_{f,E,CLT}}{f_f^*}}{1,9} - \sqrt{\left(\frac{1 + \frac{f_{f,E,CLT}}{f_{f,d}^*}}{1,9} \right)^2 - \frac{\frac{f_{f,E,CLT}}{f_f^*}}{0,95}}$$

en que:

para flexión fuera del plano

$$\begin{aligned} f_f^* &= \frac{f_{f,k}}{2,54} \cdot k_D \cdot k_H \cdot k_T \\ f_{f,E,CLT} &= \frac{1,2 \cdot E_{k,d}}{(\lambda_V)^2} \\ E_{k,d} &= \frac{(0,6 \cdot E_{r,d})}{1,76} \\ E_{r,d} &= E_r \cdot k_H \cdot k_T \\ \lambda_V &= \sqrt{\frac{l_V \cdot t_{CLT}}{(b_{CLT})^2}} \leq 50 \end{aligned}$$

l_V = longitud efectiva de volcamiento,
en [mm], según NCh1198

para flexión en el plano

$$\begin{aligned} f_f^* &= \frac{f_{f,canto,k}}{2,54} \cdot k_D \cdot k_H \cdot k_T \\ f_{f,E,CLT} &= \frac{1,2 \cdot E_{k,d}}{(\lambda_{V,canto})^2} \\ E_{k,d} &= \frac{(0,6 \cdot E_{r,d})}{1,76} \\ E_{r,d} &= E_r \cdot k_H \cdot k_T \\ \lambda_{V,canto} &= \sqrt{\frac{l_V \cdot b_{CLT}}{(t_{CLT})^2}} \leq 50 \\ l_V &= \text{longitud efectiva de volcamiento,} \\ &\text{en [mm], según NCh1198} \end{aligned}$$

NOTA $f_{f,E,CLT}$ se ha determinado para el coeficiente de variación típico de la madera que se utiliza en la madera contralaminada, COV = 30 ± 5%.

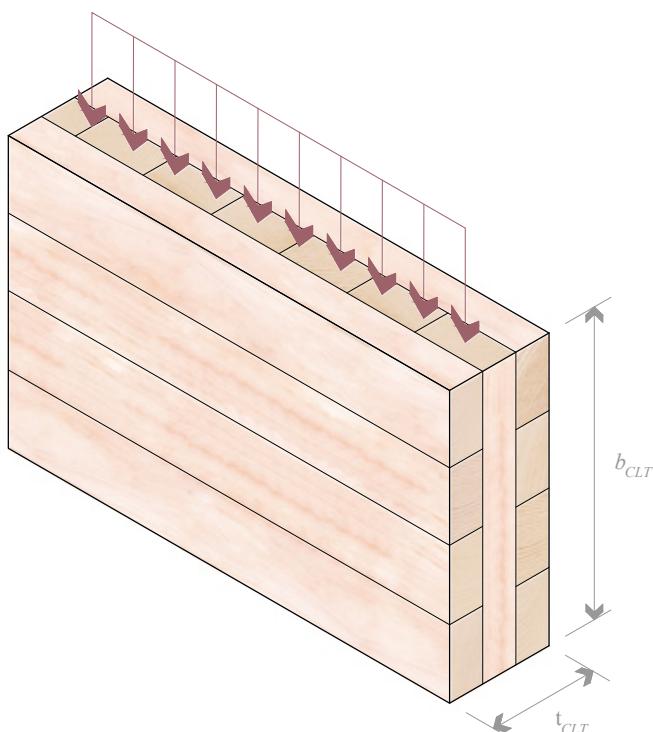


Figura 4.6 - Panel de CLT sometido a flexión en el plano, susceptible a volcamiento de canto, $\lambda_{V,canto}$.

4.1.5 Cizalle

4.1.5.1 Cizalle fuera del plano

Cuando un panel de CLT es cargado en su cara mayor de manera tal que se genera un esfuerzo cortante (por ejemplo, losas cargadas gravitacionalmente o muros sometidos a viento perpendicular), se dice que está sometido a cizalle fuera del plano por los esfuerzos de corte v_{xz} y/o v_{yz} de la Figura 4.7, los cuales generan las distribuciones de tensiones τ_{xz} y τ_{yz} respectivamente.

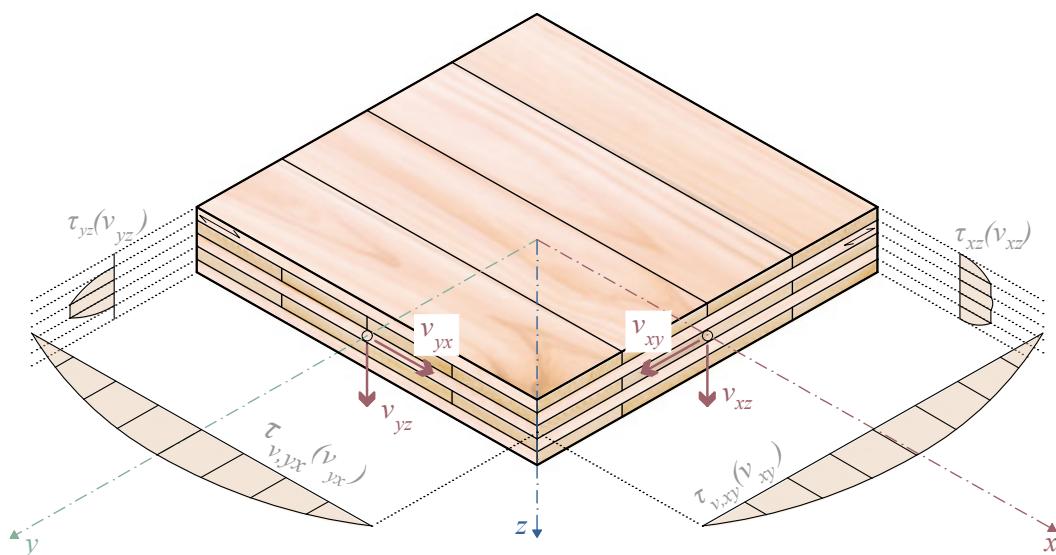
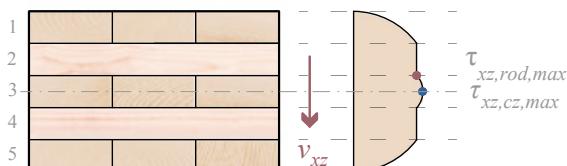


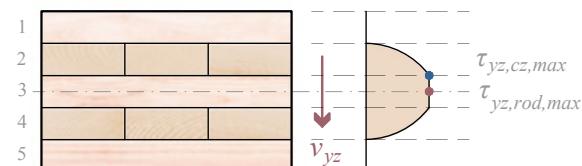
Figura 4.7 - Tensiones debidas a solicitudes de cizalle.

Como toda sección rectangular, la distribución de tensiones de corte correspondería a una parábola en que el máximo ocurre en el eje neutro, sin embargo, la diferencia en los módulos de elasticidad de las capas implica cambios en la curvatura de la parábola. De manera simplificada, para estimar la distribución de tensiones de corte, es común despreciar totalmente la rigidez de las láminas transversales, es decir $E_n=0$. Esta es la razón por la que en la sección 4.1.2.5 se determinó el momento estático como un valor neto efectivo. Este supuesto simplificado implica que la distribución de tensiones en las capas transversales sea constante (o nula si son las extremas). Por su parte, las capas longitudinales sí mantienen una distribución de tensiones que incrementa de forma parabólica.

Tal como se mencionó en la sección 4.1.2.5, cuando se aplica un cortante fuera del plano del CLT, es posible que las láminas transversales fallen por rodadura o bien que las láminas paralelas fallen por cizalle longitudinal. Cuál lámina es longitudinal y cuál es transversal depende de la cara menor que se está mirando. Por ejemplo, en el panel de 5 capas de la Figura 4.8 en la cara menor x , las láminas longitudinales son la 1, 3 y 5 (posible falla por cizalle puro), mientras que las transversales son la 2 y 4 (posible falla por rodadura). Por el contrario, al analizar la cara menor y y se invierten los papeles: 2 y 4 corresponden a láminas longitudinales, mientras que 1, 3 y 5 son transversales.



a) Cara menor x



a) Cara menor y

Figura 4.8 - Ejemplo de distribución de tensiones de corte en un panel de 5 capas sometido a cizalle fuera del plano.

Dicho esto, la tensión por corte fuera del plano en la capa longitudinal crítica (fallo por cizalle puro) y en la capa transversal crítica (fallo por rodadura) para cada cara menor se determina mediante la expresión (4.32) y (4.33), respectivamente.

CARA MENOR O BORDE x

$$(4.32) \quad \tau_{xz,cz} = \frac{v_{xz} \cdot S_{cz,x,net}}{I_{ef,x} \cdot b}$$

CARA MENOR O BORDE y

$$\tau_{yz,cz} = \frac{v_{yz} \cdot S_{cz,y,net}}{I_{ef,y} \cdot b}$$

$$(4.33) \quad \tau_{xz,rod} = \frac{v_{xz} \cdot S_{rod,x,net}}{I_{ef,x} \cdot b}$$

$$\tau_{yz,rod} = \frac{v_{yz} \cdot S_{rod,y,net}}{I_{ef,y} \cdot b}$$

Por otra parte, la tensión de diseño en cizalle longitudinal y la tensión de diseño en cizalle rodante se determinan según las ecuaciones (4.34) y (4.35), respectivamente.

CARA MENOR O BORDE x

$$(4.34) \quad f_{cz,d,x} = \frac{f_{cz,k,x}}{\Omega} \times k_D \times k_H \times k_T$$

CARA MENOR O BORDE y

$$f_{cz,d,y} = \frac{f_{cz,k,y}}{\Omega} \times k_D \times k_H \times k_T$$

$$(4.35) \quad f_{rod,d,x} = \frac{f_{rod,k,x}}{\Omega} \times k_D \times k_H \times k_T$$

$$f_{rod,d,y} = \frac{f_{rod,k,y}}{\Omega} \times k_D \times k_H \times k_T$$

en que:

$$\Omega = 2,88$$

$f_{cz,k}$ = resistencia característica al cizalle de la capa crítica

$f_{rod,k}$ = resistencia característica a la rodadura de la capa crítica

Luego, la verificación estructural implica que la solicitudación de corte debe ser menor a la capacidad del panel, según las expresiones (4.36) y (4.37).

CARA MENOR O BORDE x

$$(4.36) \quad \tau_{xz,cz} \leq f_{cz,d,x}$$

CARA MENOR O BORDE y

$$\tau_{yz,cz} \leq f_{cz,d,y}$$

$$(4.37) \quad \tau_{xz,rod} \leq f_{rod,d,x}$$

$$\tau_{yz,rod} \leq f_{rod,d,y}$$

4.1.5.2 Cizalle en el plano

Cuando un panel de CLT es cargado en una de sus caras menores o borde de manera tal que se genera un esfuerzo cortante (por ejemplo, muros de corte cargados lateralmente o vigas cargadas gravitacionalmente), se dice que está sometido a **cizalle en el plano** por los esfuerzos de corte v_{xy} y v_{yx} de la Figura 4.7, los cuales generan las distribuciones de tensiones $\tau_{v,xy}$ y $\tau_{v,yx}$, respectivamente.

La verificación de cizalle en el plano es ligeramente distinta al resto de los esfuerzos, en el sentido de que se sabe que todas las capas (tanto longitudinales como transversales) en ambas caras menores, están

resistiendo el esfuerzo de corte. Esto quiere decir que, en el eventual caso de que exista encolado de canto⁹ entre las láminas en un panel homogéneo, se considera el área bruta como valor seccional. Por ende, la distribución de corte será la parábola típica de cualquier sección rectangular. Esto se conoce en la literatura como **mecanismo de falla I**: cizalle de la sección transversal bruta.

Sin embargo, lo más común es que no se fabriquen los paneles de CLT con encolado de canto o bien existan grietas de secado, por lo que se debe asu-

mir que existe una discontinuidad entre láminas de una misma capa¹⁰. Esto implica que el esfuerzo de corte es incapaz de traspasarse de una lámina longitudinal a su lámina longitudinal adyacente, como se muestra en la distribución de corte de la izquierda en la Figura 4.9. En consecuencia, se supone que esa transmisión ocurre a través de las láminas transversales, las cuales sí son continuas a lo ancho del panel, como se muestra en la distribución de corte de la derecha en la Figura 4.9. Esto se conoce en la literatura como **mecanismo de falla II**: cizalle de la sección transversal neta efectiva.

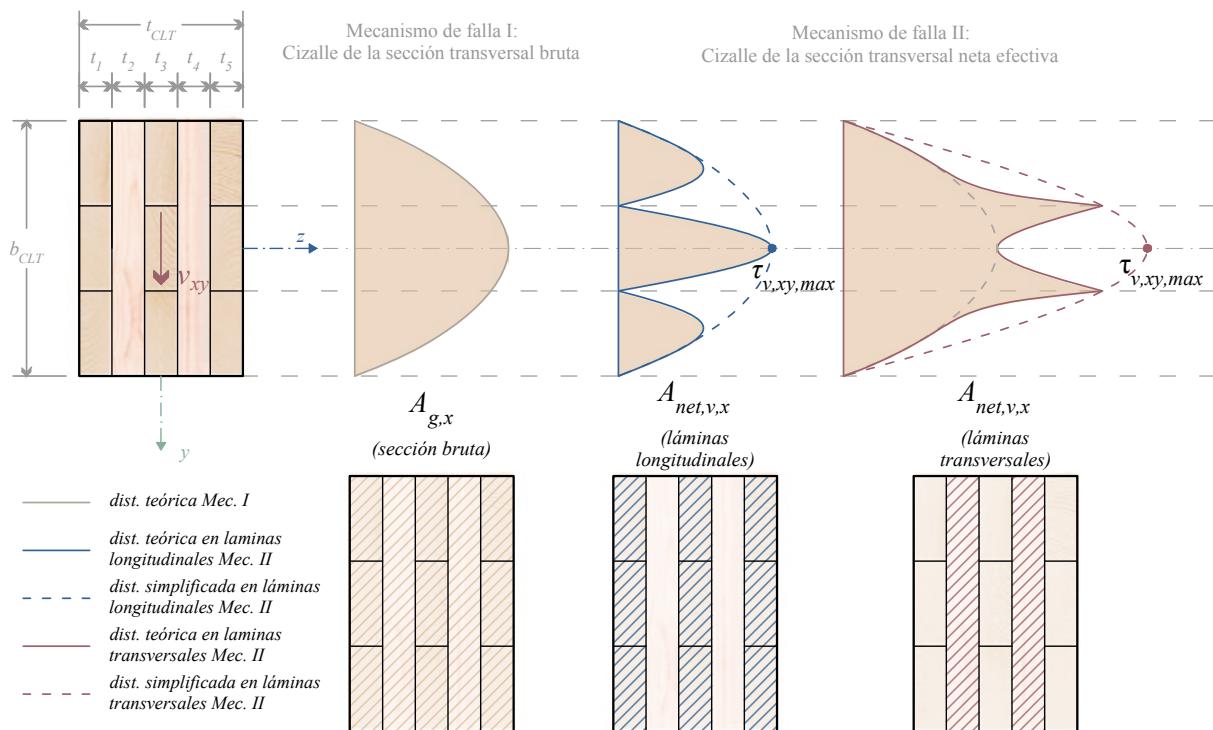


Figura 4.9 - Distribución de esfuerzo de corte en las láminas de un panel de CLT de 5 capas.

Adicionalmente, el traspaso del esfuerzo de corte entre una capa y su adyacente necesitará forzosamente de la transmisión de una torsión, ya que el encolado entre caras es precisamente lo que permite que dos capas consecutivas trabajen de forma

conjunta, resistiendo cada una de ellas su propio corte transversal. Esto se conoce en la literatura como mecanismo de falla III: cizalle por torsión de la superficie encolada entre láminas adyacentes ortogonales (ver Figura 4.10).

9. El encolado de canto es un encolado estructural entre láminas contiguas que forman una capa del panel de CLT.
10. Este hecho implícitamente significa que en la práctica el mecanismo de falla I nunca ocurrirá, dejando su existencia para la explicación teórica del mecanismo de falla II.

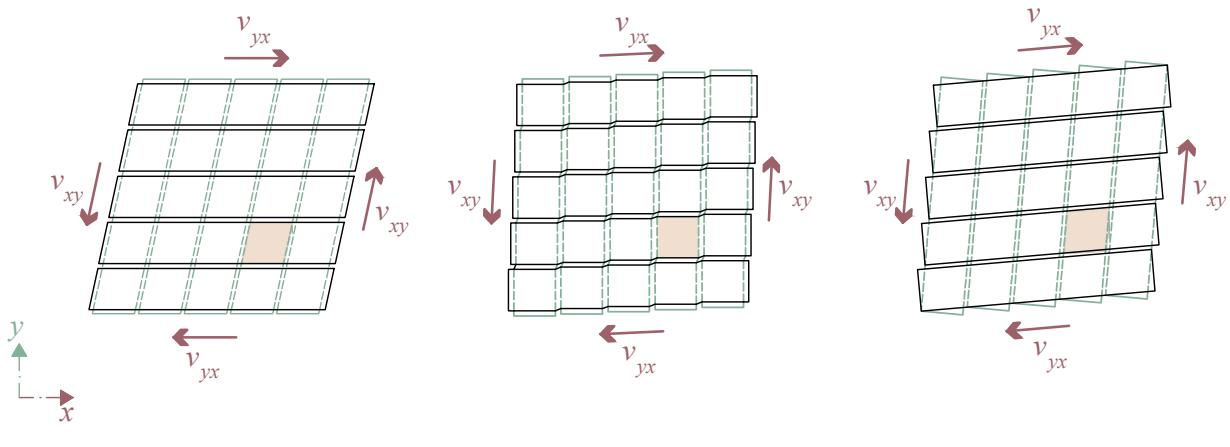


Figura 4.10 - Mecanismos de falla I, II y III en paneles de CLT sometidos a cizalle en el plano.

Tal como se comentó, lo más común es que no exista encolado de canto o bien que existan grietas de secado, por lo que en la práctica siempre se verifican los mecanismos de falla II y III, para lo cual se recomiendan las disposiciones del prEC5.

Mecanismo de falla II – Cizalle en la sección transversal neta efectiva:

Dado que tanto las capas longitudinales como las transversales transmiten el corte, pero con una distribución distinta, se trabaja con ambas secciones transversales netas efectivas para cada cara.

El prEC5 indica que en la determinación de la sección transversal neta efectiva $A_{net,v,x}$ o $A_{net,v,y}$, que incluya las capas exteriores con la dirección de la fibra paralela al eje x o y , respectivamente, el espesor de las capas exteriores deberá reducirse en un 20%. Según las definiciones de la Figura 4.1, las capas exteriores siempre están orientadas en x , por lo que en la práctica esta reducción solo aplica para $A_{net,v,x}$.

Por ello, primero se identifica la menor área neta efectiva en la cara menor x y en la cara menor y mediante las expresiones (5.38) y (5.39), respectivamente.

$$(4.38) \quad A_{net,v,x} = \min \left\{ \underbrace{\frac{E_1}{E_{r,x}} \cdot 0,8t_1 + \left(\sum_{i=2}^{n_x-1} \frac{E_i}{E_{r,x}} \cdot t_i \right)}_{\text{capas en } x} + \frac{E_{n_x}}{E_{r,x}} \cdot 0,8t_{n_x}; \underbrace{\sum_{i=1}^{n_y} \frac{E_i}{E_{r,y}} \cdot t_i}_{\text{capas en } y} \right\} \cdot b$$

$$(4.39) \quad A_{net,v,y} = \min \left\{ \underbrace{\sum_{i=1}^{n_x} \frac{E_i}{E_{r,x}} \cdot t_i}_{\text{capas en } x}; \underbrace{\sum_{i=1}^{n_y} \frac{E_i}{E_{r,y}} \cdot t_i}_{\text{capas en } y} \right\} \cdot b$$

Notar que en los casos más comunes en que $t_x \geq t_y$, la menor área neta efectiva corresponderá en ambas caras a las capas orientadas en y , es decir, $A_{net,v,x} = A_{net,v,y} = \sum_i^{n_y} \frac{E_i}{E_{r,y}} \cdot t_i \cdot b$.

En conocimiento del área neta efectiva crítica para cada cara menor, se determina el esfuerzo de cizalle máximo mediante la expresión (4.40).

CARA MENOR O BORDE x

$$(4.40) \quad \tau_{v,xy} = \frac{3 \cdot v_{xy}}{2 \cdot A_{net,v,x}}$$

CARA MENOR O BORDE y

$$\tau_{v,yx} = \frac{3 \cdot v_{yx}}{2 \cdot A_{net,v,y}}$$

Por otra parte, la tensión de diseño en cizalle de la sección neta efectiva se determina según la ecuación (4.41).

CARA MENOR O BORDE x

$$(4.41) \quad f_{v,d,x} = \frac{f_{v,k}}{\Omega} \times k_D \times k_H \times k_T$$

CARA MENOR O BORDE y

$$f_{v,d,y} = \frac{f_{v,k}}{\Omega} \times k_D \times k_H \times k_T$$

en que:

$$\Omega = 2,88$$

$f_{v,k}$ = resistencia característica al cizalle de la sección neta efectiva

Luego, la verificación estructural implica que la solicitud de corte debe ser menor a la capacidad del panel, según la expresión (4.42).

CARA MENOR O BORDE x

$$(4.42) \quad \tau_{v,xy} \leq f_{v,d,x}$$

CARA MENOR O BORDE y

$$\tau_{v,yx} \leq f_{v,d,y}$$

Mecanismo de falla III – Cizalle por torsión de la superficie encolada entre láminas adyacentes ortogonales:

Cuando la relación de aspecto b_l/t_l sea ≤ 4 , se deberá verificar adicionalmente el cizalle por torsión de la superficie encolada entre láminas adyacentes ortogonales $\tau_{cz,tor}$, el cual se determina según la expresión (4.43).

CARA MENOR O BORDE x

$$(4.43) \quad \tau_{cz,tor,x} = \frac{3}{2} \times \tau_{v,xy} \times \left(\frac{t_{l,max}}{b_l} \right)$$

CARA MENOR O BORDE y

$$\tau_{cz,tor,y} = \frac{3}{2} \times \tau_{v,yx} \times \left(\frac{t_{l,max}}{b_l} \right)$$

en que:

τ_v = esfuerzo de cizalle máximo de la sección transversal efectiva, según (5.40)

$t_{l,max}$ = máximo espesor de lámina

$b_{l,i}$ = mínimo entre el ancho de las láminas, la distancia entre un canto de lámina y una ranura, y la distancia entre ranuras dentro de una lámina, en la capa i en [mm]. En ausencia de información específica puede tomarse igual a 80 [mm]

Mientras que la tensión de diseño de cizalle por torsión de la superficie encolada entre láminas adyacentes ortogonales se determina según la ecuación (4.44).

CARA MENOR O BORDE x

$$(4.44) \quad f_{cz,tor,d,x} = \frac{f_{cz,tor,k,x}}{\Omega} \times k_D \times k_H \times k_T$$

CARA MENOR O BORDE y

$$f_{cz,tor,d,y} = \frac{f_{cz,tor,k,y}}{\Omega} \times k_D \times k_H \times k_T$$

en que:

$$\Omega = 2,88$$

$f_{cz,tor,k}$ = resistencia característica al cizalle de la sección neta efectiva

Luego, la verificación estructural implica que la solicitud de corte debe ser menor a la capacidad del panel, según la expresión (4.42).

CARA MENOR O BORDE x

$$(4.45) \quad \tau_{cz,tor,x} \leq f_{cz,tor,d,x}$$

CARA MENOR O BORDE y

$$\tau_{cz,tor,y} \leq f_{cz,tor,d,y}$$

4.1.6 Compresión

4.1.6.1 Compresión en el plano

Cuando un panel de CLT es cargado axialmente en una de sus caras menores o borde (por ejemplo, muros frente a cargas gravitacionales), se dice que está sometido a compresión en el plano por los esfuerzos axiales n_{xx} y/o n_{yy} de la Figura 4.11, los cuales generan las distribuciones de tensiones $\sigma_{c,x}$ y $\sigma_{c,y}$, respectivamente.

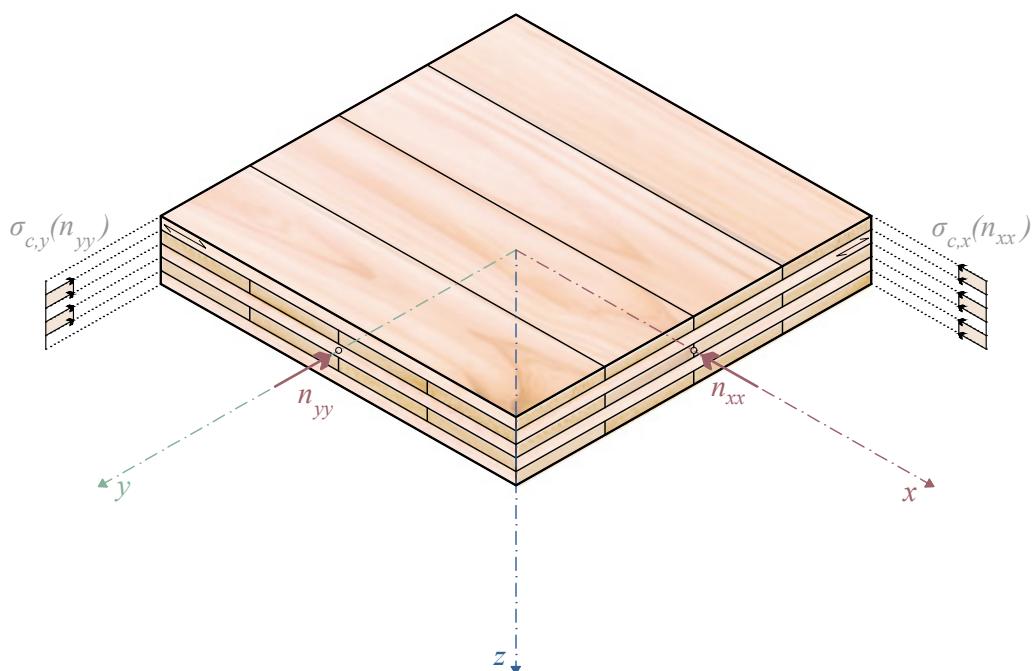


Figura 4.11 - Tensiones debidas a solicitudes de compresión en el plano.

Como cualquier elemento estructural sometido a compresión, el CLT es susceptible a pandeo, por lo que la esbeltez λ_p no debe exceder de 150 y se debe calcular para los ejes x e y por separado, mediante la expresión (4.46).

CARA MENOR O BORDE x

$$(4.46) \quad \lambda_{p,x} = \frac{l_{p,x}}{i_{ef,x}} \leq 150$$

CARA MENOR O BORDE y

$$\lambda_{p,y} = \frac{l_{p,y}}{i_{ef,y}} \leq 150$$

en que:

l_p = longitud efectiva de pandeo, según NCh1198

i_{ef} = radio de giro efectivo, según ecuación (4.10)

Tal como se mencionó en la sección 4.1.2.2, las tensiones axiales puras se verifican en el área neta efectiva de la expresión (4.5), despreciando el aporte de las láminas transversales. Dicho esto, la tensión por compresión en el plano en cada cara menor se determina mediante la expresión (4.47).

CARA MENOR O BORDE x

$$(4.47) \quad \sigma_{c,x} = \frac{n_{xx}}{A_{net,x}}$$

CARA MENOR O BORDE y

$$\sigma_{c,y} = \frac{n_{yy}}{A_{net,y}}$$

Mientras que la tensión de diseño en compresión en el plano se determina según la ecuación (4.48).

CARA MENOR O BORDE x

$$(4.48) \quad f_{cp,d,x} = \frac{f_{cp,k,x}}{\Omega} \times k_D \times k_H \times k_T \times k_\lambda$$

CARA MENOR O BORDE y

$$f_{cp,d,y} = \frac{f_{cp,k,y}}{\Omega} \times k_D \times k_H \times k_T \times k_\lambda$$

en que:

Ω = 2,40

$f_{cp,k,x}$ = resistencia característica a la compresión paralela de la cara menor x

$f_{cp,k,y}$ = resistencia característica a la compresión paralela de la cara menor y

k_λ = factor de modificación por esbeltez

Para el factor de modificación por esbeltez, se recomienda aplicar el método estadounidense mediante la expresión (4.49).

$$(4.49) \quad k_\lambda = \frac{1 + \frac{P_{c,E}}{P_{cp}^*}}{2 \times c} - \sqrt{\left(\frac{1 + \frac{P_{c,E}}{P_{cp}^*}}{2 \times c} \right)^2 - \frac{P_{c,E}}{c \times P_{cp}^*}}$$

en que:

$$\begin{aligned}
 P_{cp}^* &= A_{net} \times \frac{f_{cp,k}}{2,40} \times k_D \times k_H \times k_T \\
 P_{c,E} &= \frac{\pi^2 \times (EI)_{ap,k,d}}{l_p^2} \\
 c &= 0,9 \text{ para CLT;} \\
 (EI)_{ap,k,d} &= \frac{0,5184 \times (EI)_{ap}}{1,76} \\
 (EI)_{ap} &= \frac{(EI)_{ef,d}}{1 + \frac{k_s \times (EI)_{ef,d}}{(GA)_{ef,d} \times l_p^2}} \\
 (EI)_{ef} &= \text{rigidez efectiva a flexión de diseño, en [N·mm2], según 4.1.2.7} \\
 (GA)_{ef} &= \text{rigidez efectiva a corte de diseño, en [N], según 4.1.2.7} \\
 k_s &= \text{factor de modificación por deformación por corte, según Tabla 4.2}
 \end{aligned}$$

TABLA 4.2 – Factor de modificación por deformación por corte, k_s .

Carga	Condición de borde	k_s
Uniforme	Simplemente apoyado	11,5
	Biempotrado	57,6
Concentrada en el centro	Simplemente apoyado	14,4
	Biempotrado	57,6
Concentrada en cuartos extremos	Simplemente apoyado	10,6
Momento constante	Simplemente apoyado	11,8
Uniforme	En voladizo	4,8
Concentrada en extremo libre	En voladizo	3,6

Luego, la verificación estructural implica que la solicitud de compresión debe ser menor a la capacidad del panel, según la expresión (4.50).

CARA MENOR O BORDE x

(4.50)

$$\sigma_{c,x} \leq f_{cp,d,x}$$

CARA MENOR O BORDE y

$$\sigma_{c,y} \leq f_{cp,d,y}$$

NOTA TÉCNICA 4.3 – Alternativas de verificación de pandeo

En la práctica de cálculo con CLT es bastante frecuente que existan situaciones de posibilidad de pandeo distintas a una simple columna apoyada con una carga centrada. Por ejemplo, el CLT puede estar apoyado sobre soportes puntuales o sometido a cargas puntuales, entre otras muchas situaciones. Si bien el prEC5 recoge ciertas técnicas de modelación analítica para estos casos, la modelación computacional puede ser muy favorable para analizar pandeos locales o situaciones de inestabilidad especiales. Por ejemplo, varios programas permiten la incorporación de imperfecciones, excentricidades y cálculo de segundo orden, lo cual se facilita mucho con el análisis computacional.

4.1.6.2 Compresión fuera del plano

Cuando un panel de CLT es cargado en compresión en su cara mayor de manera local (por ejemplo, losas cargadas puntualmente por columnas o muros), se dice que está sometido a **compresión fuera del plano**.

La deformación que se produce es similar a los apoyos de vigas y pilares, por lo cual la verificación también es parecida. Tanto las normativas norteamericanas como la europea consideran un factor de modificación favorable que incrementa la capacidad a compresión normal¹¹ y que fundamentalmente depende de la capacidad de la pieza para redistribuir la tensión. En paneles de CLT (al igual que en los elementos tipo barra) se asume que, si la carga perpendicular está alejada de los bordes del tablero, se tiene una mayor capacidad de redistribución (Guindos, 2019a). En la NDS, la verificación es idéntica a la de los elementos tipo viga, por lo que para Chile se recomienda conservadoramente emplear el mismo factor k_{cn} de la NCh1198.

Dicho esto, frente a una reacción de apoyo R , la tensión por compresión perpendicular se determina mediante la expresión (4.51).

$$(4.51) \quad \sigma_{cn} = \frac{R}{A_{apoyo}}$$

Mientras que la tensión de diseño en compresión en el plano se determina según la ecuación (4.52).

$$(4.52) \quad f_{cn,d} = \frac{f_{cn,k}}{\Omega} \times k_H \times k_T \times k_{cn}$$

en que:

$$\Omega = 1,67$$

$f_{cn,k}$ = resistencia característica a la compresión normal, según Tabla 5.1

k_{cn} = factor de modificación por aplastamiento según NCh1198

Adicionalmente, se debe verificar el cizalle producido por el efecto de punzonamiento por cargas concentradas fuera del plano, lo que depende de si se emplea refuerzo o no. En este caso, se recomienda emplear las indicaciones del Anexo D del prEC5.

Paneles de CLT sin refuerzo

Los paneles de CLT sometidos a cargas concentradas fuera del plano que no cuenten con refuerzo de tornillos, se deben verificar frente al cizalle rodante producido por el efecto de punzonamiento, mediante la expresión:

$$(4.53) \quad \tau_{rod,d} \leq k_{r,pu} \times f_{rod,d}$$

En que:

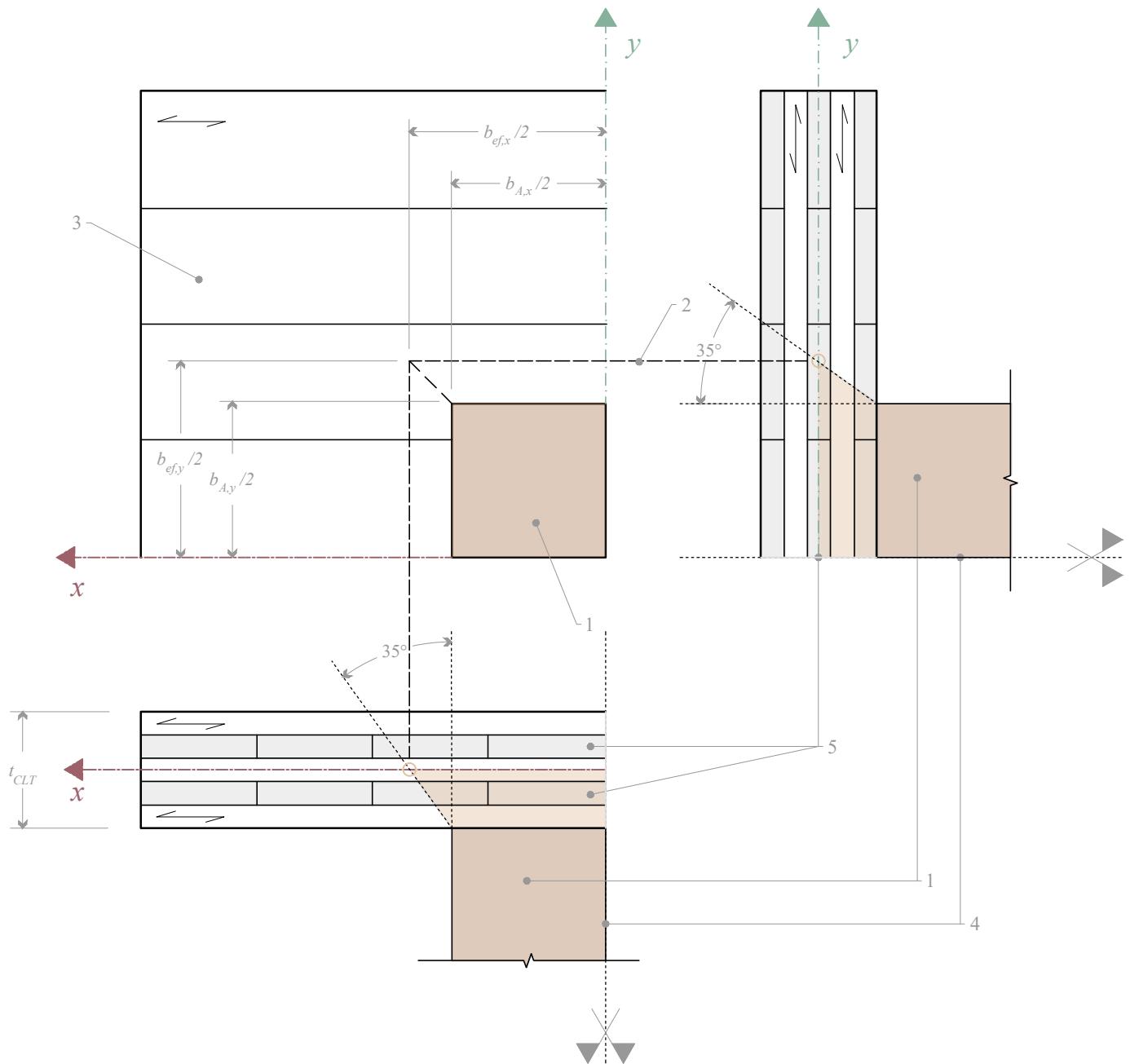
$\tau_{rod,d}$ = solicitud de cizalle rodante, en [MPa] (ver Figura 4.12)

$f_{rod,d}$ = tensión de diseño en cizalle rodante, en [MPa], según 4.1.5.1

$k_{r,pu}$ = factor de modificación por punzonamiento¹²,
 $k_{r,pu} = 1,60$

11. C_b en NDS; K_b en CSA; $k_{c,90,CLT}$ prEC5.

12. El factor $k_{r,pu}$ toma en cuenta el comportamiento no lineal y la contribución de la compresión perpendicular.



1. área de $\frac{1}{4}$ del apoyo concentrado
2. perímetro en que se verifica el cizalle
3. panel de CLT
4. bordes del panel o ejes de simetría
5. capas críticas

Figura 4.12 - Panel de CLT sin refuerzo, sometido a una carga concentrada fuera del plano.

Paneles de CLT con refuerzo de tornillos de rosca completa

Los paneles de CLT sometidos a cargas concentradas fuera del plano que se refuercen con tornillos de rosca completa insertados a $\varepsilon=45^\circ$, se deben verificar frente al cizalle producido por el efecto de punzonamiento para:

- la zona en que termina el refuerzo (ver Figura 4.13, perímetro 3) según la ecuación (4.53); y
- para la zona reforzada (ver Figura 4.13, perímetro 2), mediante la expresión:

$$(4.54) \quad \tau_{rod,d} \leq k_{r,pu} \cdot f_{rod,d} + \frac{P_{ax,d}}{2 \cdot s_1 \cdot s_{ef,2}}$$

En que:

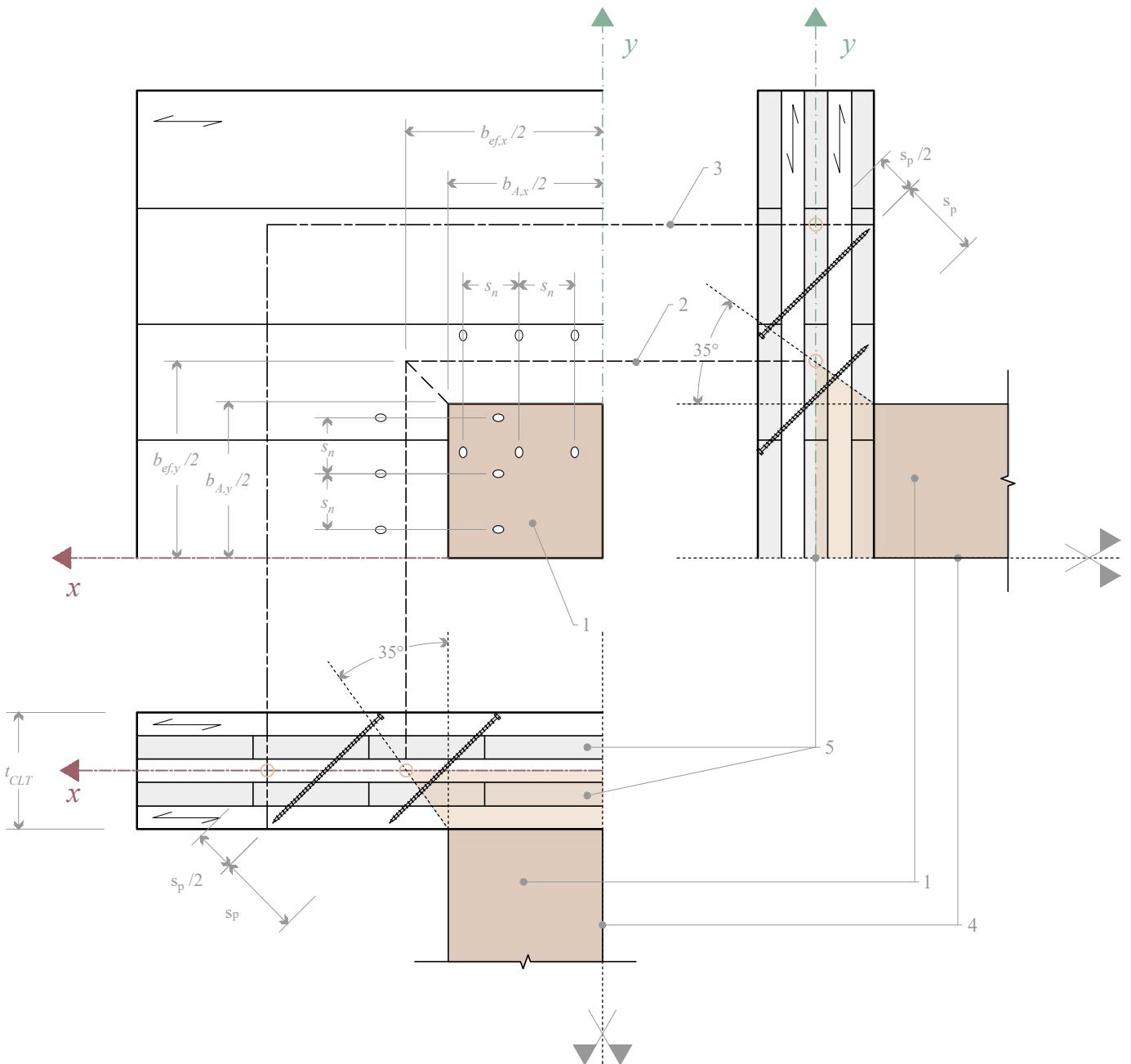
- $\tau_{rod,d}$ = solicitud de cizalle rodante, en [MPa]
- $f_{rod,d}$ = capacidad de diseño en cizalle rodante, en [MPa], según 4.1.5.1
- $k_{r,pu}$ = factor de modificación por punzonamiento, según Tabla 4.3
- $P_{ax,d}$ = capacidad de diseño de carga axial del conector, según NCh1198
- s_1 = espaciamiento de los tornillos según Figura 4.14
- $s_{ef,2}$ = espaciamiento efectivo de los tornillos según Tabla 4.3

TABLA 4.3 – Factor de modificación por punzonamiento, $k_{r,pu}$ y espaciamiento efectivo de tornillos $s_{ef,2}$ para paneles de CLT con refuerzo.

Tipo de apoyo	$k_{r,pu}$	$s_{ef,2}$
Concentrado (por ejemplo, una columna)	$k_{r,pu} = 1,60$	$s_{ef,2} = \frac{b_{ef}}{n_{perp}}$
Lineal (por ejemplo, un muro)	$k_{r,pu} = \min \left\{ 1 + 0,35 \cdot \frac{P_{ax,ad}}{2 \cdot s_1 \cdot s_{ef,2}}, 1,20 \right\}$	$s_{ef,2} = \frac{b}{n_{perp}}$

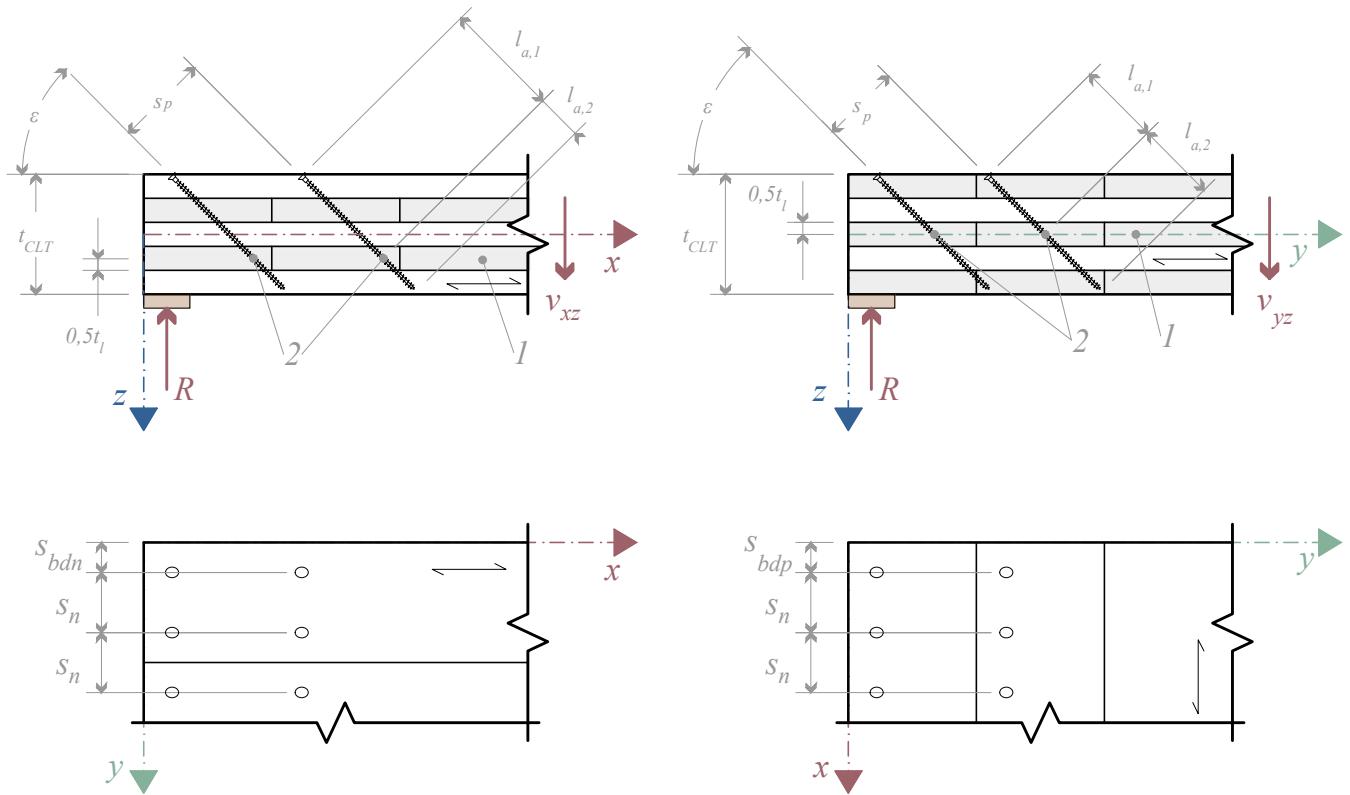
- $P_{ax,ad}$ = capacidad admisible de carga axial de un conector (sin factores de modificación);
- b_{ef} = ancho efectivo
- b = ancho en el que se reparten los tornillos en un apoyo lineal
- n_{perp} = número de tornillos perpendicular al esfuerzo de cizalle (ver Figura 4.14, donde $n_{perp}=3$)

NOTA El factor $k_{r,pu}$ toma en cuenta el comportamiento no lineal y la contribución de la compresión perpendicular.



1. área de $\frac{1}{4}$ del apoyo concentrado
2. perímetro en que se verifica el cizalle considerando el refuerzo, según (4.53)
3. perímetro en que se verifica el cizalle sin refuerzo, según (4.54)
4. bordes del panel o ejes de simetría
5. capas críticas

Figura 4.13 - Panel de CLT con refuerzo, sometido a una carga concentrada fuera del plano.



1. capa crítica
2. centro de gravedad del conector en la capa crítica

Figura 4.14 - Espaciamiento de tornillos y capa crítica en panel de CLT reforzado.

4.1.7 Tracción

4.1.7.1 Tracción en el plano

Cuando un panel de CLT es solicitado a una tracción axial en una de sus caras menores (por ejemplo, la zona traccionada en muros de corte frente a un vuelco), se dice que está sometido a tracción en el plano por los esfuerzos axiales n_{xx} y/o n_{yy} de la

Figura 4.15, los cuales generan las distribuciones de tensiones $\sigma_{t,x}$ y $\sigma_{t,y}$ respectivamente.

Al igual que la compresión en el plano, estas tensiones axiales se verifican en el área neta efectiva de la expresión (4.5), despreciando el aporte de las láminas transversales. Dicho esto, la tensión por tracción en el plano en cada cara menor se determina mediante la expresión (4.55).

CARA MENOR O BORDE x

$$(4.55) \quad \sigma_{t,x} = \frac{n_{xx}}{A_{net,x}}$$

CARA MENOR O BORDE y

$$\sigma_{t,y} = \frac{n_{yy}}{A_{net,y}}$$

Mientras que la tensión de diseño en tracción en el plano se determina según la ecuación (4.56).

CARA MENOR O BORDE x

$$(4.56) \quad f_{tp,d,x} = \frac{f_{tp,k,x}}{\Omega} \times k_D \times k_H \times k_T$$

CARA MENOR O BORDE y

$$f_{tp,d,y} = \frac{f_{tp,k,y}}{\Omega} \times k_D \times k_H \times k_T$$

en que:

$$\Omega = 2,70$$

$f_{tp,k,x}$ = resistencia característica a la tracción paralela de la cara menor x

$f_{tp,k,y}$ = resistencia característica a la tracción paralela de la cara menor y

Luego, la verificación estructural implica que la solicitación de tracción debe ser menor a la capacidad del panel, según la expresión (4.57).

CARA MENOR O BORDE x

$$(4.57) \quad \sigma_{t,x} \leq f_{tp,d,x}$$

CARA MENOR O BORDE y

$$\sigma_{t,y} \leq f_{tp,d,y}$$

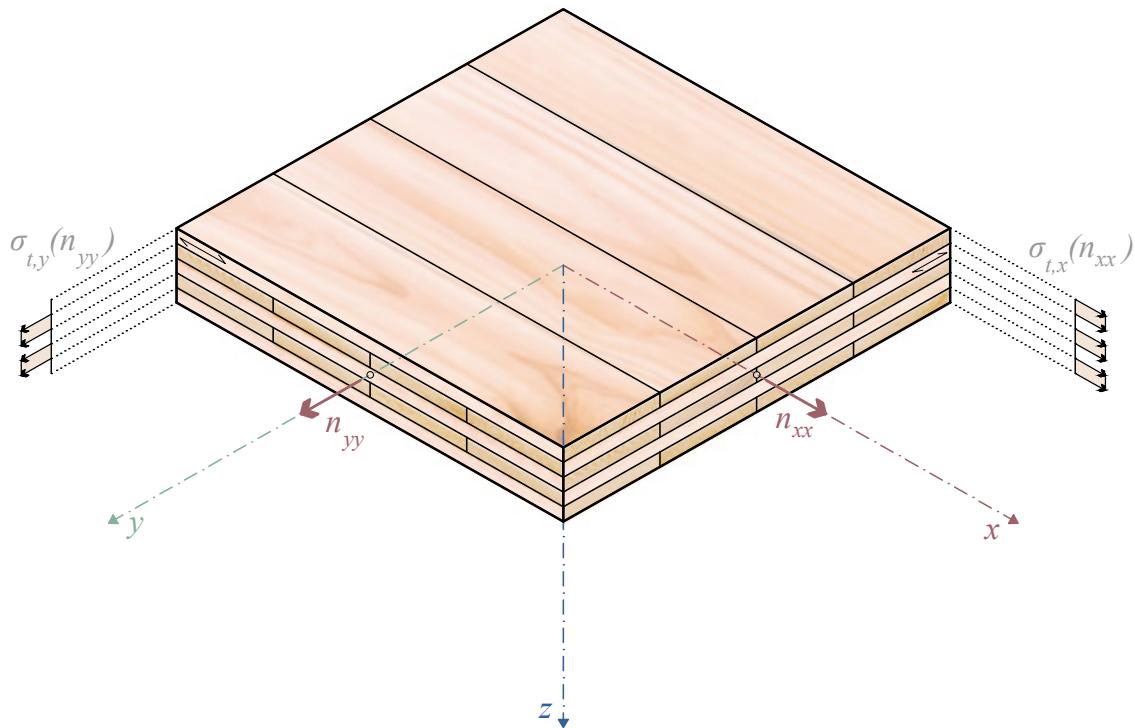


Figura 4.15 - Tensiones debidas a solicitudes de tracción.

4.1.7.2 Tracción fuera del plano

Cuando un panel de CLT es cargado en tracción en su cara mayor de manera local (por ejemplo, losas cargadas puntualmente con elementos colgantes), se dice que está sometido a **tracción fuera del plano**.

El prEC5 indica que este tipo de solicitud se debe evitar por diseño y que, en caso de que no sea posible, se deberán cubrir estos esfuerzos con conectores de acero.

4.1.8 Combinaciones de esfuerzos

Para las interacciones de tensiones se recomienda emplear las combinaciones del prEC5, las cuales son más completas que las combinaciones de esfuerzo normadas en Norteamérica. En general, se asume que la separación de tensiones biaxiales en diferentes láminas permite analizar cada dirección por separado. A continuación, se resumen las interacciones que mayormente se consideran en el cálculo analítico.

4.1.8.1 Flexión fuera del plano y flexión en el plano

Los elementos solicitados simultáneamente por flexión fuera del plano y flexión en el plano se deben verificar para los ejes x e y por separado, según la expresión (4.58).

CARA MENOR O BORDE x

$$(4.58) \quad \frac{\sigma_{f,x}}{f_{f,d,x}} + \frac{\sigma_{f,canto,x}}{f_{f,canto,d,x}} \leq 1$$

CARA MENOR O BORDE y

$$\frac{\sigma_{f,y}}{f_{f,d,y}} + \frac{\sigma_{f,canto,y}}{f_{f,canto,d,y}} \leq 1$$

4.1.8.2 Flexión fuera del plano y tracción en el plano

Los elementos solicitados simultáneamente por flexión fuera del plano y tracción en el plano se deben verificar para los ejes x e y por separado, según las expresiones (4.59) para la zona flexo-traccionada y (4.60) para la zona flexo-comprimida.

CARA MENOR O BORDE x

$$(4.59) \quad \frac{\sigma_{f,x}}{f_{ft,d,x}} + \frac{\sigma_{tp,x}}{f_{tp,d,x} \times k_{red,b}} \leq 1$$

CARA MENOR O BORDE y

$$\frac{\sigma_{f,y}}{f_{ft,d,y}} + \frac{\sigma_{tp,y}}{f_{tp,d,y} \times k_{red,b}} \leq 1$$

$$(4.60) \quad \frac{\sigma_{f,x} - \sigma_{tp,x}}{f_{fv,d,x}} \leq 1$$

$$\frac{\sigma_{f,y} - \sigma_{tp,y}}{f_{fv,d,y}} \leq 1$$

4.1.8.3 Flexión y compresión en el plano

Los elementos solicitados simultáneamente por flexión y compresión en el plano se deben verificar para los ejes x e y por separado, según la expresión (4.61).

CARA MENOR O BORDE x

$$(4.61) \quad \frac{\sigma_{f,x}}{f_{fv,d,x}} + \frac{\sigma_{f,canto,x}}{f_{fv,canto,d,x}} + \left(\frac{\sigma_{cp,x}}{f_{cp,d,x} \cdot k_{red,b}} \right)^2 \leq 1$$

CARA MENOR O BORDE y

$$\frac{\sigma_{f,y}}{f_{fv,d,y}} + \frac{\sigma_{f,canto,y}}{f_{fv,canto,d,y}} + \left(\frac{\sigma_{cp,y}}{f_{cp,d,y} \cdot k_{red,b}} \right)^2 \leq 1$$

4.8.1.4 Cizalle fuera del plano y cizalle en el plano

Los elementos solicitados simultáneamente por cizalle fuera del plano y cizalle en el plano se deben verificar para los ejes x e y por separado, según las expresiones (4.62) para el fallo por cizalle longitudinal y (4.63) para el fallo por rodadura.

CARA MENOR O BORDE x

$$(4.62) \quad \frac{\tau_{xz,cz}}{f_{cz,d,x}} + \frac{\tau_{v,xy}}{f_{v,d,x}} \leq 1,0$$

CARA MENOR O BORDE y

$$\frac{\tau_{yz,cz}}{f_{cz,d,y}} + \frac{\tau_{v,yx}}{f_{v,d,y}} \leq 1,0$$

$$(4.63) \quad \frac{\tau_{xz,rod}}{f_{rod,d,x}} + \frac{\tau_{v,xy}}{f_{v,d,x}} \leq 1,0$$

$$\frac{\tau_{yz,rod}}{f_{rod,d,y}} + \frac{\tau_{v,yx}}{f_{v,d,y}} \leq 1,0$$

Cuando la relación de aspecto b/t , sea ≤ 4 , se deberá verificar adicionalmente el cizalle por torsión de la superficie encolada entre láminas adyacentes ortogonales $\tau_{cz,tor}$, reemplazando la componente τ_v por la de cizalle por torsión según la ecuación (4.43).

4.1.8.5 Torsión y cizalle

Los elementos solicitados a un momento torsor m_{xx} o m_{yy} , según la Figura 4.5, se deben verificar en combinación con las tensiones de cizalle fuera del plano y cizalle en el plano para los ejes x e y por separado.

La solicitud por torsión τ_{tor} se debe determinar con el módulo de torsión J según la expresión:

CARA MENOR O BORDE x

$$(4.64) \quad \tau_{tor,b,x} = \frac{m_{xx}}{\alpha \cdot b \cdot t_{CLT}^2}$$

CARA MENOR O BORDE y

$$\tau_{tor,b,y} = \frac{m_{yy}}{\alpha \cdot b \cdot t_{CLT}^2}$$

$$(4.65) \quad \tau_{tor,t,x} = \frac{m_{xx}}{\beta \cdot t_{CLT} \cdot b^2}$$

$$\tau_{tor,t,y} = \frac{m_{yy}}{\beta \cdot t_{CLT} \cdot b^2}$$

en que:

b = longitud de la arista mayor, en [mm]. Puede ser b_{CLT} o L , dependiendo del caso;

α, β = coeficientes de torsión para secciones rectangulares, según Tabla 4.4

Tabla 4.4 – Tabla de coeficientes de torsión para secciones rectangulares.

b/t	1,00	1,50	2,00	3,00	6,00	10,0	∞
α	0,208	0,231	0,246	0,267	0,299	0,312	0,333
β	0,141	0,196	0,229	0,263	0,299	0,312	0,333

b = longitud de la arista mayor, en [mm]. Puede ser b_{CLT} o L , dependiendo del caso;

t = longitud de la arista menor, en [mm]. t_{CLT} para la mayoría de los casos.

Luego, la combinación de esfuerzos se debe verificar para los ejes x e y , mediante la expresión:

CARA MENOR O BORDE x

$$(4.64) \quad \frac{\tau_{tor,x}}{f_{cz,d,x}} + \frac{\tau_{xz,cz}}{f_{cz,d,x}} + \frac{\tau_{v,xy}}{f_{v,d,x}} \leq 1,0$$

CARA MENOR O BORDE y

$$\frac{\tau_{tor,y}}{f_{cz,d,y}} + \frac{\tau_{yz,cz}}{f_{cz,d,y}} + \frac{\tau_{v,yx}}{f_{v,d,y}} \leq 1,0$$

REFERENCIAS

AWC NDS-2018 - National Design Specification for Wood Construction (2018).
www.awc.org.

CSA O86:19 Engineering Design in Wood (2019).

FPIInnovations. (2019). *Canadian CLT Handbook* (E. Karacabeyli & S. Gagnon, Eds.; Vols. 1, 2). FPIInnovations.

Guindos, P. (2019a). *Conceptos Avanzados del Diseño Estructural con Madera. Parte II: CLT, Modelación Numérica, Diseño Anti-incendios y Ayudas al Cálculo* (P. Guindos, Ed.; Vol. 2). Ediciones UC.

Guindos, P. (2019c). *Fundamentos del Diseño y la Construcción con Madera*.

NCh1198-2024 Madera - Construcciones En Madera - Cálculo (2024).

NCh2165-2023 MLE - Propiedades Físicas y Mecánicas de Especies Coníferas (2023).

PrEN 1995-1-1 - Eurocode 5: Design of Timber Structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings (2023).

Reyes, C., & Guindos, P. (2024). *Manual de modelación computacional y diseño estructural de edificios de madera contralaminada (CLT)*.

UNE-EN 338:2016 - Madera Estructural. Clases Resistentes. (2016).

UNE-EN 16351:2021 - Estructuras de Madera. Madera Contralaminada. Requisitos. (2021).



CAPÍTULO 5

FUEGO: RESISTENCIA Y REQUERIMIENTOS

La construcción con CLT no solo ha revolucionado el diseño estructural con madera, sino que también desafía los enfoques convencionales de diseño contra incendios que tradicionalmente se han empleado para proteger estructuras no combustibles y, por lo tanto, las propias premisas básicas de la ingeniería de protección contra incendios en general. Desde el punto de vista de la protección contra incendios de estructuras combustibles, antes del CLT existían principalmente dos tipos de estructuras que llevaban, a su vez, dos estrategias diferentes de protección bien diferenciadas y consolidadas:

- I. **Estructuras panelizadas con entramado ligero.** Dado que estas estructuras tienen gran cantidad de elementos de pequeña escuadria, si se dejase la madera desnuda resultaría una estructura con una elevada relación *superficie expuesta de madera / volumen de las piezas de madera*

(relación S/V). En este contexto, la propagación del incendio resultaría muy problemática por haber gran superficie de exposición, además de que las piezas de madera de volumen reducido tienen muy baja resistencia al fuego.

Dicho esto, el enfoque tradicional de estrategia contra incendios ha sido la **total encapsulación** con yeso cartón. Esto convierte los panelizados en elementos no combustibles y, por lo tanto, incrementa la resistencia frente al fuego de la estructura. Adicionalmente, en Norteamérica principalmente, esta filosofía ha sido complementada con estrategias activas tales como rociadores, alarmas, etc. Esto se ha materializado durante décadas y la regulación de la protección del entramado ligero de madera se ha consolidado y aceptado culturalmente.

- II. **Estructuras de entramado pesado.** Estas estructuras ofrecen propiedades antagónicas a las anteriores. En particular, el entramado pesado, muy a menudo materializado con vigas y columnas de MLE de gran escuadria, ofrece una relación S/V muy baja. En este contexto, la estrategia tradicional de protección contra incendios ha sido principalmente dejar la madera expuesta, ya que, al haber menor superficie de exposición, el confinamiento del incendio sigue siendo una opción viable en muchos casos por el hecho de que las piezas de gran volumen tienen gran resistencia al fuego y potencialmente permiten la autoextinción luego del *burn-out*¹³.

También es posible detallar la protección pasiva de uniones, en especial disminuyendo la exposición de partes metálicas, embebiéndolas en el interior de las piezas de madera, o bien empleando tableros de protección, entre otras estrategias. Adicionalmente, al igual que en las estructuras panelizadas con entramado ligero, en algunos países esta estrategia pasiva se ha complementado con estrategias activas, como rociadores y detectores de humo/calor entre otros, lo que ha llevado igualmente a una consolidación cultural y normativa de la estrategia a seguir para lograr un nivel de seguridad aceptable en estas estructuras.

13. *Burn-out*: Extinción de un incendio tras el consumo total del material combustible disponible.

Sin embargo, la primera diferencia que ha surgido con el CLT, es que en realidad no califica en ninguna de las dos categorías anteriores. Por lo general, si se dejase el CLT expuesto se tendría una gran cantidad de superficie, pero también una gran cantidad de volumen, por lo que la relación S/V sería intermedia. La segunda diferencia que desafía el enfoque tradicional es que, si se dejase el CLT expuesto, a pesar de tener una gran resistencia al fuego intrínseca, alteraría la carga térmica que se ha empleado por décadas para analizar el nivel de seguridad de los edificios y que ha dado lugar a todos los enfoques de protección prescriptiva. Una tercera diferencia generada por el CLT, quizás de menor envergadura respecto de las dos anteriores, es que algunos adhesivos, especialmente algunos de los que se emplearon en las fases iniciales de desarrollo del CLT, sufrían el efecto de la delaminación (caída de láminas expuestas al fuego por reblandecimiento térmico de adhesivos) durante el incendio, lo que modifica la premisa básica de diseño prescriptivo de la madera, que se basa en una tasa de carbonización constante.

En este contexto, la situación normativa del CLT contra incendios, tanto a nivel prescriptivo regulatorio como a nivel de cálculos en base al desempeño por parte del profesional a cargo del sistema de protección contra incendios, no está concluida ni consolidada como sí lo están los dos métodos anteriores. Por un lado, encapsular el CLT tal como se hace con el entramado ligero, se traducirá en estructuras resistentes al fuego eventualmente sobreprotegidas, ya que el CLT tiene mayor resistencia inherente al fuego que el entramado ligero. Por otro lado, la propagación del fuego en estructuras de CLT expuesto sería mayor que un entramado pesado.

Por lo anterior, desde los inicios de los edificios de CLT la estrategia de protección contra incendios ha sido la de encapsular, aplicando de este modo principios de diseño prescriptivos tradicionales de estructuras no combustibles, lo que puede interpretarse como un escenario conservador. Sin embargo, a medida que el sistema estructural de CLT se ha ido consolidando, las normativas a nivel internacional han ido flexibilizando el grado

permisible de exposición, en respuesta a los estudios sobre el comportamiento de los materiales en distintas condiciones, y el desarrollo de nuevos sistemas de protección contra incendios, como productos ignífugos o materiales más resistentes, permitiendo un mayor grado de exposición. Por ejemplo, el International Building Code (IBC), establece los requisitos para el uso del material en función del tipo de edificio, su resistencia y la clasificación de los elementos de la edificación. Dicho grado de exposición depende del uso del edificio y las condiciones particulares de cada proyecto. No obstante, es importante notar que, en opinión de los autores, la consolidación de la regulación respecto al grado de exposición permisible irá evolucionando con el tiempo, ya que la exposición del CLT no solo afecta a la resistencia al fuego y a la propagación, sino que también a las premisas básicas de cargas térmicas empleadas por el profesional a cargo del sistema de protección contra incendios. Por lo tanto, es de esperar que esta discusión requiera aún bastante desarrollo.

Mientras el desarrollo prescriptivo no se ha consolidado, en varios edificios icónicos de CLT se han llevado a cabo análisis de diseño basado en el desempeño en situaciones de incendio. En estos diseños se toman en cuenta aspectos no considerados por el enfoque prescriptivo, tales como la autoextinción, tasas de carbonización no constantes, distintos grados de exposición, etc (FPIInnovations, 2019b). Es también de esperar que el enfoque de diseño basado en el desempeño se vaya desarrollando a la par que el diseño prescriptivo, y probablemente pueda ser un enfoque válido en el futuro.

Los contenidos que siguen en este capítulo, se dirigen a profesionales que cuenten con conocimientos teóricos básicos del diseño y construcción en madera, particularmente sobre su comportamiento y protección frente a incendios. En caso de que el usuario quiera revisar en mayor profundidad estos conceptos preliminares, se recomiendan los documentos "[Guía de operación de edificaciones en madera](#)" (CIM UC, 2021a) y "[Manual de soluciones constructivas en entramado ligero en madera](#)" (CIM UC, 2021b).

5.1 RESISTENCIA AL FUEGO DE LA MADERA Y PARTICULARIDADES DEL CLT

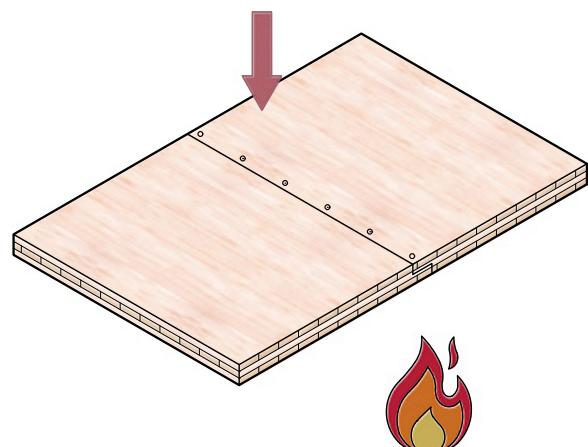
En el ámbito de la edificación, la resistencia al fuego se define como la capacidad de un elemento de construcción de soportar la exposición a un incendio durante un tiempo determinado, basado en el cumplimiento de 4 criterios:

- i. capacidad de soporte de carga durante el tiempo requerido de resistencia al fuego (función estructural);
- ii. estanqueidad a las llamas (función divisoria);
- iii. aislamiento térmico: 160 °C promedio o 200 °C puntual máxima, en la cara no expuesta (función divisoria); y
- iv. no emisión de gases inflamables y/o el humo (función divisoria).

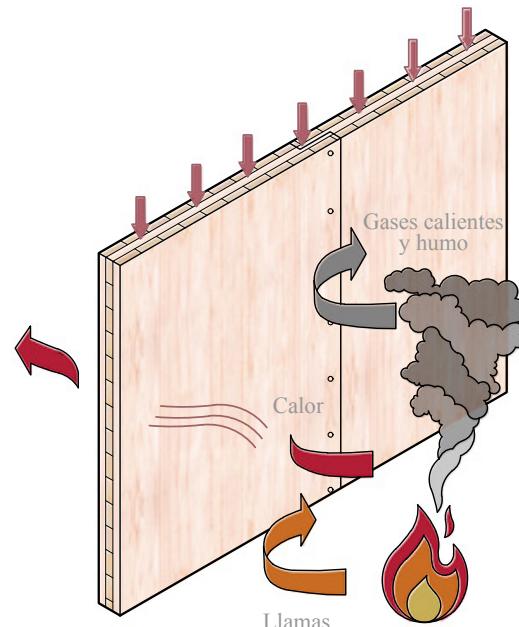
En la práctica se aplican fundamentalmente 5 métodos de cálculo para predecir el efecto del fuego. Una vez predicho el efecto, algunos de ellos permiten estimar la resistencia estructural en caso de incendio. Los 5 métodos son, de menor a mayor complejidad, los siguientes:

- i. Utilizar soluciones constructivas con certificación de resistencia al fuego;
- ii. Método de las componentes aditivas;
- iii. Método de la sección efectiva;
- iv. Método de la resistencia y rigidez reducidas;
- v. Métodos basados en la modelación del fuego.

En el presente capítulo se desarrolla de manera más detallada el método de la sección efectiva, prescrito originalmente en Europa, probablemente el más extendido en el mundo y pronto normativo en Chile¹⁴. Si se quiere revisar introduc-



a) función estructural



b) función divisoria

Figura 5.1 - *Criterios para el cumplimiento de la resistencia al fuego*

toriamente los otros métodos, se sugiere el libro “Fundamentos del diseño y la construcción con madera” (Guindos, 2019c).

Para entender de mejor manera el método de la sección efectiva, es necesario primero repasar su base

14. A la fecha de publicación de esta guía, se encuentra en sesiones de comité técnico la norma prNCh3808 - Madera – Construcciones en madera – Cálculo de estructuras expuestas al fuego.

científica sobre la carbonización de la madera. En la sección 5.1.1, se describe este fenómeno; luego, la sección 5.1.2 presenta el método en detalle para el CLT expuesto; la sección 5.1.3 describe el método de cálculo con revestimientos de protección y, finalmente, la sección 5.1.4 menciona brevemente cómo se vincula este método con las verificaciones estructurales.

5.1.1 Combustión y carbonización de la madera

La reacción fisicoquímica de la madera frente al fuego es un fenómeno bastante complejo, que está fuera del alcance de explicar en detalle en este capítulo. No obstante, vale la pena una explicación simplificada desde el proceso de la **combustión** (posterior a que han ocurrido las reacciones de evaporación y pirólisis) y su relación con la reacción mecánica.

Para que se mantenga activa la combustión se requieren 3 factores: (1) **calor**, que lo aporta principalmente la llama; (2) **oxígeno**, aportado por el ambiente; y (3) un **combustible**, que son los gases emitidos por la pirólisis. En este punto, son diferenciables 3 zonas fisicoquímicas en la sección transversal: del exterior al interior se tiene primero la capa de carbón, luego la zona de pirólisis y, por último, la madera no pirolizada, donde está ocurriendo la reacción de evaporación.

La combustión continúa hacia el interior de la madera, pero a una velocidad prácticamente constante,

conocida como **tasa de carbonización**. Esta tasa es lenta, ya que la capa de carbón proporciona aislamiento térmico y dificulta el flujo de calor desde la fuente hasta la zona de pirólisis. En otras palabras, la madera se “protege a sí misma” a través de esta capa carbonizada.

Bajo la capa de carbón, la zona de pirólisis está sometida a temperaturas que van entre 250 °C y 350 °C, y es aquí donde se forman los gases inflamables que se difunden hacia el exterior a través de la capa de carbón y de las grietas, hasta que reaccionan con oxígeno en la superficie y comienzan a arder. Una menor proporción de gases se difunden hacia el interior y en conjunto con una porción del vapor de agua (generado en la reacción de evaporación), calientan la madera inalterada que se encuentra bajo la zona de pirólisis.

Las temperaturas superiores a 40 °C (e inferiores a 300 °C) sólo se dan en una zona estrecha de unos 10~15 [mm] de profundidad inmediatamente por debajo de la capa de carbón, involucrando parte de la zona de pirólisis y parte de la zona de madera no pirolizada. A esta capa se le conoce como **madera caliente**. Tanto la resistencia como la rigidez son significativamente menores en esta capa intermedia que en la madera fría.

El proceso descrito y sus conceptos se ilustran en la Figura 5.2.

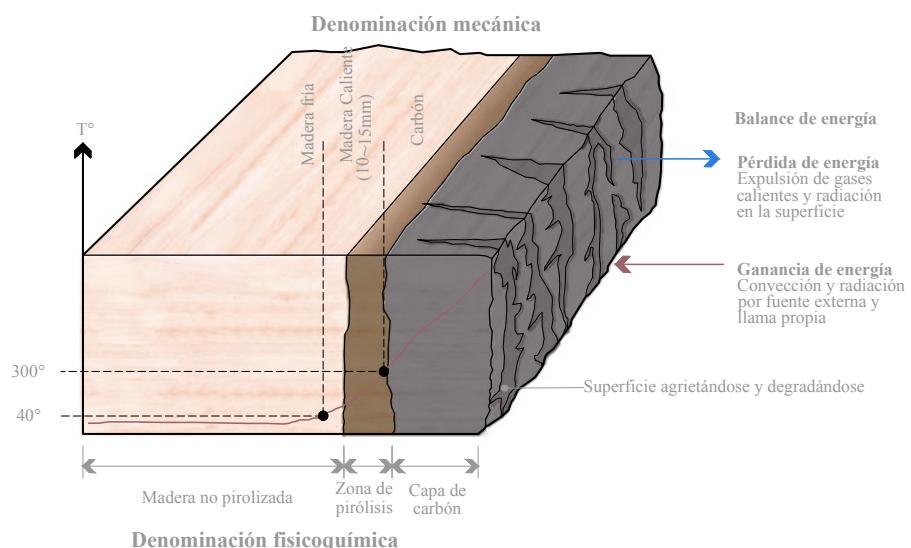


Figura 5.2 - Fenómeno de combustión y carbonización.

5.1.2 Método de la sección efectiva en CLT

Este método se basa en la hipótesis de las 3 capas de degradación mecánica de la madera (carbón, madera caliente y madera fría) y la tasa de carbonización constante, lo que permite determinar la sección resistente de cualquier pieza estructural para cualquier tiempo de exposición. Dado que se basa en las capas de carbonización, por la relación *Superficie/Volumen (S/V)*, este método funciona mejor con piezas estructurales de gran escuadria y peor con el entramado ligero. La filosofía del método consiste en suponer que tanto la capa carbonizada como la capa caliente de la madera no tienen ninguna resistencia estructural. Por lo tanto, la resistencia estructural en caso de incendio consiste en estimar la sección resistente de la capa fría para determinado tiempo.

5.1.2.1 Carbonización, delaminación e influencia del adhesivo

Si las capas del CLT se fabrican con encolado de canto o la holgura entre láminas (o ancho de las ranuras) es menor a 2 [mm] (ver Figura 5.3a.), se puede asumir una tasa de carbonización unidimensional $\beta_0=0,65$ [mm/min], con lo que el espesor de la capa carbonizada se determina según la expresión:

$$(5.1) \quad d_{char,0} = \beta_0 \cdot t$$

en que:

$d_{char,0}$ = espesor de carbonización unidimensional, en [mm];

β_0 = 0,65 [mm/min], tasa de carbonización unidimensional;

t = Tiempo de exposición al fuego, en [min].

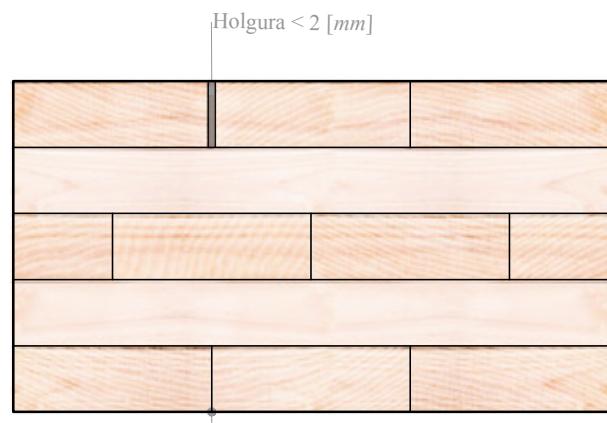
En caso contrario, en que la holgura entre láminas (o ancho de las ranuras) es mayor o igual a 2 [mm] (ver Figura 5.3b.), se asume una tasa de carbonización nominal $\beta_n=0,8$ [mm/min], que incorpora el efecto de redondeo de aristas y de la presencia de fisuras, con lo que el espesor de la capa carbonizada se determina según la expresión:

$$(5.2) \quad d_{char,n} = \beta_n \cdot t$$

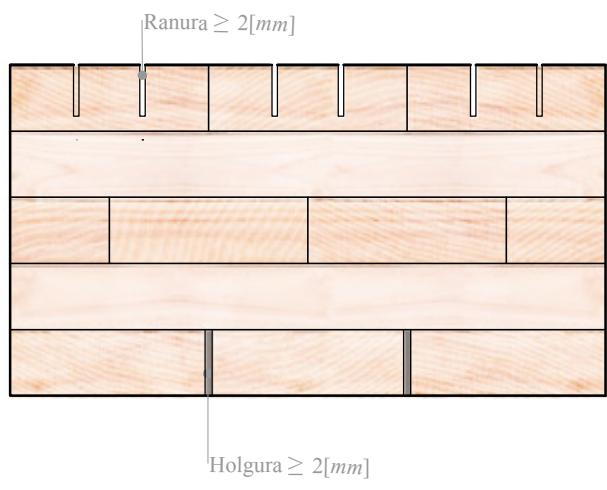
en que:

$d_{char,n}$ = espesor de carbonización nominal, en [mm];

β_n = 0,8 [mm/min], tasa de carbonización nominal.



a) tasa de carbonización unidimensional β_0

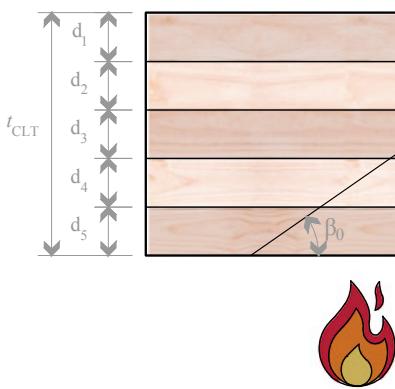


b) tasa de carbonización nominal β_n

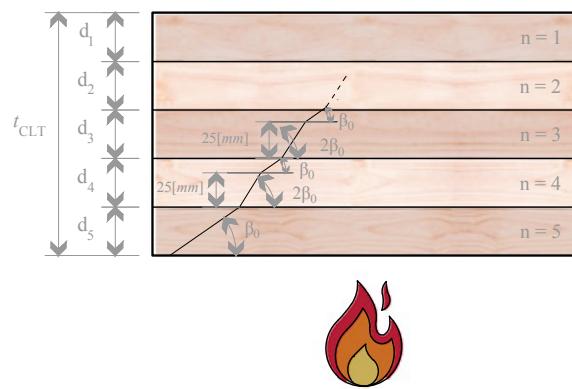
Figura 5.3 - Condiciones posibles que determinan el supuesto de tasa de carbonización

En el caso de elementos de madera encolada, como el CLT, la carbonización puede ser diferente a la de elementos de madera aserrada, debido a su composición heterogénea con adhesivos. Si el adhesivo es resistente al calor, es decir, se desempeña de tal manera que la adherencia entre láminas no se pierde en ningún momento del incendio, se puede asumir que la tasa de carbonización del CLT es similar a la de la madera aserrada, en cuyo caso la tasa β_0 o β_n es constante en el tiempo, como se ilustra en la Figura 5.4a.

En caso contrario, cuando el adhesivo no es resistente al calor, ocurrirá el efecto conocido como **delaminación** en que se desprende la capa carbonizada



a) adhesivo resistente al fuego



b) adhesivo no resistente al fuego (delaminación)

Figura 5.4 - Esquema de carbonización en un panel de CLT con tasa β_0^{15}

previo a que se degrade por completa. En este caso, se asume que solo la primera capa se carbonizará de manera normal y luego la tasa de carbonización de los primeros 25 [mm] de cada capa se duplica, es decir $2\beta_0$ o $2\beta_n$ según corresponda. Posterior a los 25 [mm] la tasa vuelve a ser la original. Como resultado, se obtiene un esquema de carbonización bilineal como el ilustrado en la Figura 5.4b.

Los adhesivos resistentes al fuego (es decir, sin delaminación) son principalmente adhesivos fenólicos y aminoplásticos, pero actualmente también existen algunos adhesivos a base de poliuretano. El comportamiento al fuego de un adhesivo específico depende de su composición química más que del tipo de adhesivo al que pertenezca (Swedish Wood, 2022). Para verificar el desempeño del adhesivo, respecto a su capacidad de mantener las capas del CLT adheridas durante todo el incendio, existen métodos de ensayos estandarizados como el procedimiento expuesto en el Anexo B de (ANSI-APA PRG-320 2019 - Standard for Performance-Rated Cross-Laminated Timber, 2019). Dado que no todos los fabricantes de CLT utilizan adhesivos resistentes al calor, es importante verificar mediante la ficha técnica del producto que el material se fabrique con un adhesivo resistente al calor si es necesario.

5.1.2.2 Sección efectiva

El procedimiento y consideraciones de la sección anterior permiten determinar el espesor de la primera capa de degradación mecánica, la capa de carbón d_{char} . El efecto de la degradación de la segunda capa, la capa de madera caliente, se considera mediante la dimensión d_0 según las Tabla 5.1, Tabla 5.2 o Tabla 5.3, para paneles de 3, 5 o 7 capas respectivamente. La suma de ambas capas se denomina el espesor de carbonización efectivo d_{ef} , es decir, determinado mediante la expresión (5.3) o (5.4) según corresponda.

$$(5.3) \quad d_{ef} = d_{char,0} + d_0$$

$$(5.4) \quad d_{ef} = d_{char,n} + d_0$$

en que:

$d_{char,0}$ = espesor de carbonización unidimensional, en [mm];

$d_{char,n}$ = espesor de carbonización nominal, en [mm];

d_0 = espesor de degradación de la madera caliente, en [mm].

15. En el cálculo de resistencia al fuego, se prefiere la letra d para denominar el espesor de capas, en vez de t como en el Capítulo 4, para no confundir con el tiempo.

Los valores de d_0 están basados en resultados experimentales y simulaciones térmicas derivados por *SP Technical Research Institute of Sweden (2010)*.

Cuando están expuestos al fuego, los muros de CLT se pandean en dirección contraria de la que

procede el fuego, lo que significa que las tensiones de flexo-tracción sólo pueden ocurrir en el lado no expuesto del muro, y por lo tanto, d_0 sólo se indica para la exposición al fuego en el lado flexo-comprimido. Los muros expuestos al fuego por ambos lados deben diseñarse utilizando valores basados en resultados experimentales.

TABLA 5.1 - Espesor d_0 en [mm] para paneles de CLT de 3 capas (t_{CLT} en [mm]).

Incendio en la cara	Losas		Muros	
	No protegido	Protegido	No protegido	Protegido
Sometida a tracción	$d_0 = \frac{t_{CLT}}{30} + 3,7$	$d_0 = 10$	Irrelevante	Irrelevante
Sometida a compresión	$d_0 = \frac{t_{CLT}}{25} + 4,5$	$d_0 = \min \left\{ \frac{13,5}{t_{CLT}} + 7, 12,5 \right\}$	$d_0 = \frac{t_{CLT}}{25} + 3,95$	$d_0 = \min \left\{ \frac{14,5}{t_{CLT}} + 7, 12,5 \right\}$

TABLA 5.2 - Espesor d_0 en [mm] para paneles de CLT de 5 capas (t_{CLT} en [mm]).

Incendio en la cara	Losas		Muros	
	No protegido	Protegido	No protegido	Protegido
Sometida a tracción	$d_0 = \frac{t_{CLT}}{100} + 10$	$75 \leq t_{CLT} \leq 100$ $d_0 = 34 - \frac{t_{CLT}}{4}$	Irrelevante	Irrelevante
Sometida a compresión	$d_0 = \frac{t_{CLT}}{20} + 11$	$t_{CLT} > 100$ $d_0 = \frac{t_{CLT}}{35} + 6$	$d_0 = \frac{t_{CLT}}{15} + 10,5$	$d_0 = 20$

TABLA 5.3 - Espesor d_0 en [mm] para paneles de CLT de 7 capas (t_{CLT} en [mm]).

Incendio en la cara	Losas	Muros
Sometida a tracción	$105 \leq t_{CLT} \leq 175$ $d_0 = \frac{t_{CLT}}{6} + 2,5$ $t_{CLT} > 175$ $d_0 = 10$	Irrelevante
Sometida a compresión	$105 \leq t_{CLT} \leq 175$ $d_0 = \frac{t_{CLT}}{6} + 2,5$ $t_{CLT} > 175$ [mm] $d_0 = 13$	$105 \leq t_{CLT} \leq 175$ $d_0 = \frac{t_{CLT}}{6} + 4$ $t_{CLT} > 175$ $d_0 = 16$

Nota: En losas no se distingue "No protegido/Protegido" porque d_0 es igual en ambos escenarios. De forma análoga ocurre con la cara comprimida de muros, en tanto, en la cara traccionada la determinación de d_0 es irrelevante.

Finalmente se determina el espesor efectivo del panel, $t_{CLT,ef}$, restando el espesor de carbonización efectivo:

$$(5.5) \quad t_{CLT,ef} = t_{CLT} - d_{ef}$$

Si el espesor restante de una capa resistente d_i es inferior a 3 [mm], no debe incluirse en el cálculo de espesor efectivo del panel (ver Figura 5.5). Con este nuevo espesor se determinan los valores seccionales efectivos con las mismas expresiones de la sección 4.1.2.

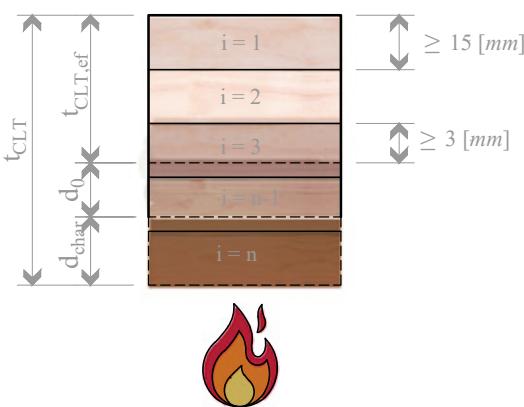


Figura 5.5 - Método de la sección efectiva en CLT

5.1.3 Encapsulamiento: elementos protegidos mediante revestimiento

Pese a la capacidad del CLT de resistir por sí solo una exposición a fuego, en ciertas situaciones puede ser preferible e incluso necesario el uso de protección adicional mediante revestimiento. Este suele materializarse con una o más capas de tableros de yeso cartón, entablados de madera o tableros a base de madera¹⁶.

Esta protección introduce dos nuevas variables: t_f como el tiempo de falla del revestimiento y t_{ch} como el tiempo en que inicia la carbonización en el CLT inicialmente protegido. Entonces, se tienen 3 posibles escenarios para la tasa de carbonización:

- el CLT no está protegido, por ende, aplica lo presentado en la sección 5.1.2;
- el CLT está inicialmente protegido y la carbonización comienza antes de la falla del revestimiento, es decir $t_{ch} < t_f$ (ver 5.1.3.1);
- el CLT está inicialmente protegido y la carbonización comienza en el minuto en que falla el revestimiento, es decir $t_{ch} = t_f$ (ver 5.1.3.2).

16. Posiblemente hay otros productos comerciales que estén certificados para utilizarse como revestimiento de protección frente a fuego. En cualquier caso, el revestimiento utilizado no debe producir humo al exponerse al fuego.

El tiempo de falla t_f de los revestimientos de protección se determina a partir de ensayos. Alternativamente, para tableros de yeso cartón se pueden utilizar las ecuaciones de la Tabla 5.4.

TABLA 5.4 - Tiempos de falla de revestimientos de yeso cartón (según Anexo D prNCh3808)

Yeso Cartón	Losas		Muros	
	t_f [min]	Condición	t_f [min]	Condición
1 ST	$1,8 \cdot e_p - 7$	$12,5 \leq e_p \leq 15$	$1,9 \cdot e_p - 7$	$9 \leq e_p \leq 15$
	20	$e_p > 15$	21,5	$e_p > 15$
2 ST			$2,1 \cdot e_{p,tot} - 14$	$25 \leq e_{p,tot} \leq 30$
		-	49	$e_{p,tot} > 30$
3 ST		-	55	$e_{p,tot} > 37,5$
	$e_p + 10$	$12,5 \leq e_p \leq 16$	$4,5 \cdot e_p - 24$	$9 \leq e_p \leq 18$
1 RF	26	$e_p > 16$	57	$e_p > 18$
				$e_{p,RF} > 15$ y $e_{p,tot} > 27$
1 RF + 1 ST ¹	50	$e_{p,RF} > 15$	81	
				$25 \leq e_{p,tot} \leq 31$
2 RF	$2 \cdot e_{p,tot} - 3$	$25 \leq e_{p,tot} \leq 31$	$4 \cdot e_{p,tot} - 40$	$25 \leq e_{p,tot} \leq 31$
	59	$e_{p,tot} > 31$	84	$e_{p,tot} > 31$

e_p = espesor del revestimiento de protección, en [mm];

$e_{p,RF}$ = espesor del tablero de yeso cartón tipo RF, en [mm];

$e_{p,tot}$ = suma de los espesores de tableros de protección, en [mm].

NOTA 1 El tablero RF es la capa exterior y el ST la interior.

NOTA 2 Estas ecuaciones son genéricas y han demostrado ser conservadoras.

Por otra parte, el tiempo en que inicia la carbonización t_{ch} se determina mediante la expresión (5.6) para entablados o tableros de madera:

$$(5.6) \quad t_{ch} = \frac{e_p}{\beta_0}$$

en que:

e_p = espesor del tablero o el espesor total en caso de varias capas, en [mm];

β_0 = tasa de carbonización del tablero, en [mm/min]. Para $e_p=20$ [mm] y $\rho_k=450$ [kg/m^3]:

$\beta_0=1,0$ para terciados;

$\beta_0=0,9$ para entablados u otros tableros de madera;

Para espesores $e_p < 20$ [mm] y/u otras densidades características ρ_k , se debe ajustar la tasa de carbonización según la expresión:

$$(5.7) \quad \beta_{0,\rho,e} = \beta_0 \cdot k_\rho \cdot k_e$$

en que:

$$k_\rho = \sqrt{\frac{450}{\rho_k}} \quad \beta_0 = \sqrt{\frac{20}{e_p}}$$

Mientras que para tableros de yeso cartón, se determina mediante la expresión (5.8) o bien (5.9) si es que las holguras en las juntas de tableros de yeso cartón son mayores a 2 [mm] y estas no son rellenadas o tratadas según corresponda.

$$(5.8) \quad t_{ch} = 2,8 \cdot e_p - 14$$

$$(5.9) \quad t_{ch} = 2,8 \cdot e_p - 23$$

en que:

e_p = espesor del tablero, en [mm];

En caso de que el revestimiento consista en 2 tableros de yeso cartón de Tipo ST o RH se considera $e_p = e_{p,ext} + 0,5 \cdot e_{p,int}$. Si el tablero es Tipo RF se considera $e_p = e_{p,ext} + 0,8 \cdot e_{p,int}$. Ambos casos siempre y cuando el espaciamiento de las fijaciones de la capa interior no sea mayor que el de la capa externa.

Por otra parte, el largo requerido de los conectores de fijación de los tableros (clavos o tornillos), se determina con la expresión:

$$(5.10) \quad l_{f,req} = e_p + d_{char} + l_a$$

en que:

e_p = espesor del tablero o el espesor total en caso de varias capas, en [mm];

d_{char} = espesor de carbonización $d_{char,0}$ o $d_{char,n}$ según corresponda, en [mm];

l_a = longitud de penetración del conector en la madera no carbonizada.

$$l_{a,min} = 10 \text{ [mm]}$$

5.1.3.1 Carbonización antes de la falla

del revestimiento $t_{ch} < t_f$

Cuando el CLT está inicialmente protegido y la carbonización comienza antes de la falla del revestimiento, se asume una tasa de carbonización **β menor a la original** durante el periodo de tiempo $t_{ch} \leq t \leq t_f$. Para representar este efecto, se considera una tasa de carbonización $k_2 \cdot \beta$. Para tableros de

yeso cartón Tipo RF se estima según la expresión (5.11). Para otros tipos de tablero, si no se tiene más información, se debe suponer $k_2=1$ o revisar las disposiciones de la sección del prNCh3808.

$$(5.11) \quad k_2 = 1 - 0,018 \cdot e_p$$

en que:

e_p = espesor del tablero o, en caso de varias capas, al espesor del tablero central, en [mm];

Una vez se alcanza el tiempo $t=t_f$ y el revestimiento de protección falla, la tasa de carbonización se incrementa al doble del valor original β , es decir $2\beta_0$ o $2\beta_n$ según corresponda, durante el periodo de tiempo $t_f \leq t \leq t_a$. Esto es el mismo efecto que ocurre en la delaminación.

El tiempo t_a representa lo que se demora en formar una capa de 25 [mm] de carbón y se calcula según la expresión:

$$(5.12) \quad t_a = \frac{25 - (t_f - t_{ch}) \cdot k_2 \cdot \beta}{2 \cdot \beta} + t_f$$

Como resultado, se obtiene una curva trilineal como la curva 2 de la Figura 5.6. Notar la comparación con la curva 1 que representa el caso no protegido con una tasa de carbonización constante (similar a la Figura 5.4a de carbonización con adhesivo resistente al fuego).

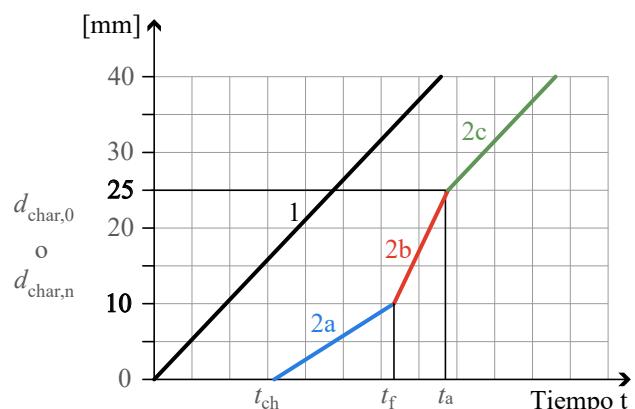


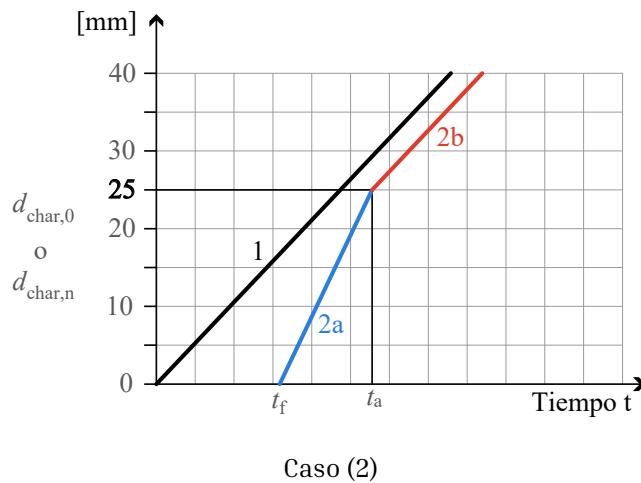
Figura 5.6 - Variación en el espesor de carbonización en función del tiempo para $t_{ch} < t_f$

5.1.3.2 Carbonización en el tiempo de falla del revestimiento $t_{ch}=t_f$

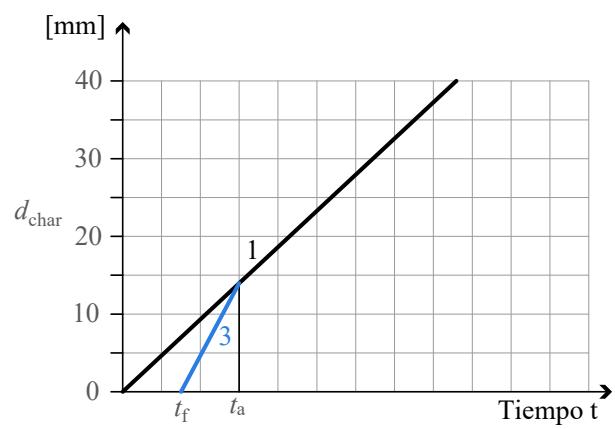
Cuando el CLT está inicialmente protegido y la carbonización comienza en el minuto en que falla el revestimiento, comienza inmediatamente la carbonización a la tasa duplicada 2β , durante el periodo de tiempo $t_f \leq t \leq t_a$. En esta condición, se pueden dar dos situaciones: el tiempo t_a representa lo que se demora en formar una capa de 25 [mm] de carbón o la curva de carbonización interseca con la curva original sin protección. Se calcula según la expresión:

$$(5.13) \quad t_a = \min \begin{cases} \frac{25}{2 \cdot \beta} + t_f & \text{caso (2)} \\ \frac{25}{2 \cdot t_f} & \text{caso (3)} \end{cases} \quad \text{Figura 5.7}$$

Como resultado, se obtiene una curva bilineal como la curva 2 o la curva 3 de la Figura 5.7.



Caso (2)



Caso (3)

Figura 5.7 - Variación en el espesor de carbonización en función del tiempo para $t_{ch}=t_f$

5.1.4 Verificación estructural

En el capítulo 4 se presentaron las distintas verificaciones estructurales que se deben realizar en un panel de CLT, contextualizando primero las expresiones generales (5.14), (5.15) y (5.16). Esta sección describe brevemente cómo se adaptan estas expresiones generales a una verificación estructural frente a incendio.

$$(5.14) \quad \text{Solicitudación de diseño} \leq \text{Capacidad de diseño}$$

$$(5.15) \quad \text{Solicitudación de diseño} = \frac{\text{Esfuerzo por 1 [m] de ancho}}{\text{Valor seccional por 1 m de ancho}}$$

$$(5.16) \quad \text{Capacidad de diseño} = f_{d,ASD} = \frac{f_k}{\Omega} \times \prod_i k_i$$

Esté el CLT expuesto o protegido, el método descrito en las secciones 5.1.2 y 5.1.3 permite determinar el espesor efectivo del panel, $t_{CLT,ep}$ en cada instante de tiempo. Se debe evaluar el minuto según la exigencia

de F de la OGUC (ver sección 5.2) para el elemento de construcción que se esté diseñando. Posteriormente, con este valor se calculan los valores seccionales efectivos con las mismas expresiones de la sección 4.1.2, obteniendo el denominador de la expresión (5.15).

En cuanto al numerador, *esfuerzo por 1 [m] de ancho*, se considera que el estado de carga en condición de incendio disminuye por dos razones: evacuación y probabilidad de simultaneidad de cargas accidentales. Esto se representa con combinaciones de carga que consideran factores de minoración según el tipo de solicitudación. La Tabla 5.5 indica los factores de combinación para distintos tipos de solicitudación según el proyecto de norma prNCh3808¹⁷, mientras que la Tabla 5.6 presenta un ejemplo de cómo se aplican a las combinaciones de carga según la NCh3171.

TABLA 5.5 - Factores de combinación para estados de carga en condición de incendio (según prNCh3808).

Solicitudación	Factor
Sobrecargas de uso (L)	
Pisos residenciales	0,5
Áreas de oficinas	0,5
Áreas de congregación de personas	0,7
Áreas comerciales	0,7
Áreas de almacenamiento	0,9
Techos	0
Pasarelas y plataformas de mantención	0
Cargas de nieve (S)	
Techos con cota \leq 1.000 m.s.n.m	0,2
Techos con cota $>$ 1.000 m.s.n.m	0,5
Viento (W)	
Sismo (E)	

TABLA 5.6 - Ejemplo de combinaciones ASD en frío y caliente para uso habitacional bajo cota 1.000 m.s.n.m.

	Condición en frío – NCh3171	Condición de incendio – prNCh3808
1)	D	D
2)	$D+L$	$D+0,5 \cdot L$
3)	$D+(Lr \text{ o } S \text{ o } R)$	$D+0,2 \cdot S$
4)	$D+0,75 \cdot L+0,75 \cdot (Lr \text{ o } S \text{ o } R)$	$D+0,5 \cdot L+0,2 \cdot S$
5a)	$D\pm W$	$D\pm 0,2 \cdot W$
5b)	$D\pm E$	$D\pm 0,2 \cdot E$
6a)	$D\pm 0,75 \cdot W+0,75 \cdot L+0,75 \cdot (Lr \text{ o } S \text{ o } R)$	$D\pm 0,2 \cdot W+0,5 \cdot L+0,2 \cdot S$
6b)	$D\pm 0,75 \cdot E+0,75 \cdot L+0,75 \cdot S$	$D\pm 0,2 \cdot E+0,5 \cdot L+0,2 \cdot S$
7)	$0,6 \cdot D\pm W$	$0,6 \cdot D\pm 0,2 \cdot W$
8)	$0,6 \cdot D\pm E$	$0,6 \cdot D\pm 0,2 \cdot E$

17. Dado que a la fecha de publicación de esta guía la norma aún se encuentra en Comité Técnico, podría haber algunas modificaciones. Se debe siempre revisar la última versión vigente.

Con esto, queda determinado el lado izquierdo de la expresión general (5.14). En cuanto al lado derecho, *capacidad de diseño*, los códigos internacional también indican una modificación por la baja probabilidad de ocurrencia de incendios: en lugar de trabajar con las resistencias características (asociadas al percentil 5%), se ajustan al percentil 20% mediante el factor de modificación k_{fr} . En el caso del CLT este factor toma el valor **$k_{fi}=1,15$** . Es decir:

(5.17)

$$\text{Capacidad de diseño} = f_{d,ASD} = \frac{f_k}{\Omega} \times k_{fi} \times \prod_i k_i$$

5.2 REQUERIMIENTOS NORMATIVOS

Los requerimientos normativos frente al fuego establecidos por la OGUC se presentan en el “Capítulo 3, de las condiciones de seguridad contra incendio, del Título 4, de la arquitectura”. Se estipula que toda edificación deberá cumplir con las normas mínimas de seguridad contra incendio. Los objetivos principales son facilitar el salvamento de los ocupantes en caso de incendio (evacuación), reducir al mínimo el riesgo de incendio, evitar la propagación del fuego dentro del edificio y hacia edificaciones colindantes y facilitar la extinción del incendio.

Para cumplir con los objetivos mencionados, el artículo 4.3.1 de la OGUC distingue dos tipos de protección contra incendios, la protección (i) pasiva y (ii) activa. “La **protección pasiva** se basa en elementos de construcción que por sus condiciones físicas aislan la estructura de un edificio de los efectos del fuego durante un determinado lapso”. Por otro lado, la **protección activa** está “compuesta por sistemas que, conectados a sensores o dispositivos de detección, entran automáticamente en funcionamiento”. Pese a no mencionarse explícitamente, estos sistemas de protección no son excluyentes y se pueden (y se recomienda dentro de lo posible) utilizar de forma complementaria.

Desde el ámbito de la protección pasiva, la resistencia al fuego a la que debe responder una solución constructiva viene dada en primer lugar por el **tipo de edificación** (a, b, c o d) según la clasificación del artículo 4.3.4 de la OGUC, la cual depende del destino, el número de pisos y una tercera variable

que puede ser: (1) según la superficie edificada, (2) la carga de ocupación, o (3) la densidad de carga de combustible; para lo cual se utilizan la Tabla 1, Tabla 2 o Tabla 3 del mismo artículo, respectivamente. En el caso de edificios habitacionales, se utiliza la Tabla 1, dependiente de la superficie edificada.

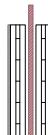
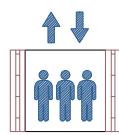
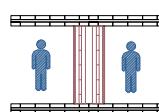
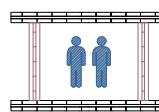
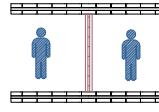
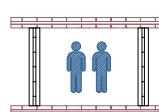
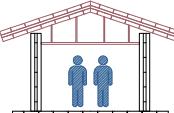
En segundo lugar, habiendo definido el tipo de edificación, la resistencia al fuego requerida de cada solución se indica en la Tabla del artículo 4.3.3, diferenciando 9 grupos distintos de elementos. En la Tabla 5.7, se presenta un cruce entre ambas tablas para las exigencias mínimas requeridas en una edificación de uso habitacional, dado el enfoque de esta guía de diseño.

Por último, para acreditar la resistencia al fuego de una solución constructiva se puede optar entre cuatro alternativas:

- i. Realizar un informe de ensayo según la NCh935-1 emitido por alguna Institución Oficial de Control Técnico de Calidad de los Materiales y Elementos Industriales para la Construcción.
- ii. Adoptar una solución del Listado Oficial de Comportamiento al Fuego de Elementos y Componentes de la Construcción (MINVU);
- iii. Realizar un Estudio de Seguridad con ensayos emitidos por entidades extrajeras reconocidas bajo normas ASTM, laboratorios UL o normas DIN.
- iv. Certificación de asimilación de la solución constructiva mediante un profesional especialista, según la NCh3684/2.¹⁸

18. Entre las normas de asimilación, se encuentra la NCh3684-1-2022, sin embargo, esta edición está enfocada en soluciones constructivas de entramado liviano de madera o acero galvanizado, siendo no aplicable para madera masiva.

TABLA 5.7 - Requerimientos frente al fuego para elementos de construcción de edificios habitacionales según OGUC (elaboración propia)

Nº	Nombre	Icono	Cantidad de Pisos Tipo de edificación			
			1 y 2 d	3 y 4 c	5 b	6 o más a
-1	Muro cortafuego		F - 120	F - 120	F - 150	F - 180
-2	Muros zona vertical de seguridad y caja de escalera		F - 60	F - 90	F - 120	F - 120
-3	Muros caja ascensores		F - 60	F - 60	F - 90	F - 120
-4	Muros divisorios entre unidades (hasta la cubierta)		F - 60	F - 60	F - 90	F - 120
-5	Elementos soportantes verticales		F - 30	F - 60	F - 90	F - 120
-6	Muros no soportantes y tabiques		-	-	F - 15	F - 30
-7	Escaleras		-	F - 15	F - 30	F - 60
-8	Elementos soportantes horizontales (incluidas terrazas)		F - 30	F - 60	F - 90	F - 120
-9	Techumbre incluido cielo falso		F - 15	F - 30	F - 60	F - 60

REFERENCIAS

ANSI-APA PRG-320 2019 - Standard for Performance-Rated Cross-Laminated Timber (2019).
www.ansi.org

CIM UC. (2021a). *Guía de operación de edificaciones en madera.*

CIM UC. (2021b). *Manual de Soluciones Constructivas.*

FPIInnovations. (2019). *Canadian CLT Handbook* (E. Karacabeyli & S. Gagnon, Eds.; Vols. 1, 2).
FPIInnovations.

Guindos, P. (2019). *Fundamentos del Diseño y la Construcción con Madera.*

MINVU. (2024). *ED16-2024 Listado Oficial de Comportamiento al Fuego de Elementos y Componentes de la Construcción del Ministerio de Vivienda y Urbanismo.*

NCh0935-1-of-1997 *Prevención de Incendio En Edificios - Ensayo de Resistencia al Fuego - Parte 1 Elementos de Construcción En General* (1997).

NCh3171-2017 *Diseño Estructural - Disposiciones Generales y Combinaciones de Cargas* (2017).

NCh3684-1-2022 *Determinación de La Clasificación de Resistencia al Fuego - Método de Asimilación - Parte 1 En Base a Ensayos Nacionales* (2022).

NCh3684-2-2022 *Determinación de La Clasificación de Resistencia al Fuego - Método de Asimilación - Parte 2 En Base a Ensayos Extranjeros* (2022).

SP Technical Research Institute of Sweden. (2010). *Fire safety in timber buildings: Technical guideline for Europe.*

Swedish Wood. (2022). *The CLT Handbook CLT structures-design and detailing.*
www.traguiden.se,



CAPÍTULO 6

DISEÑO HIGROTÉRMICO

La envolvente de un edificio es un sistema de materiales y componentes que separa físicamente los espacios interiores de los exteriores. Esta envolvente controla el flujo de calor, aire y humedad (tanto en forma de vapor de agua como de agua líquida), además de cumplir funciones estructurales, acústicas, de protección contra incendios, entre otras. El diseño de la envolvente (*enclosure design*) es por ende un diseño holístico que involucra diversas temáticas dentro de la proyección de una obra, siendo el confort higrotérmico una de estas.

En esta guía se entiende por diseño higrotérmico el **análisis de la transferencia de calor por conducción y de vapor de agua** a través de una solución constructiva perteneciente a la envolvente (muros perimetrales y techumbre)¹⁹, sin considerar la radiación solar ni el flujo de agua líquida. Un adecuado diseño higrotérmico de la envolvente de una edificación es necesario para asegurar el confort, la eficiencia energética y su durabilidad.

Optimizar el rendimiento higrotérmico permite mantener temperaturas de confort y una buena calidad de aire interior. Como consecuencia de un buen desempeño higrotérmico de un edificio se logra implícitamente una mejor eficiencia energética en su uso y ocupación. Esto implica beneficios económicos y ambientales al reducir el consumo de energía, los gastos en calefacción y enfriamiento y el consumo de leña (lo que a su vez disminuye la emisión de material particulado al ambiente). Además, permite prevenir la aparición de patologías constructivas, prolongar la vida útil de la edificación y a reducir los costos asociados al mantenimiento.

Este capítulo se enfoca en aquellos profesionales que ya tienen conocimientos teóricos básicos del diseño higrotérmico de edificios. En caso de que el usuario quiera revisar en mayor profundidad conceptos preliminares, se recomienda revisar el material en la página web de [DITEC²⁰](#) y el "[Manual de soluciones constructivas en entramado ligero en madera](#)" (CIM UC, 2021b)(CIM UC, 2021b).

En la sección 6.1, se analiza el desempeño higrotérmico inherente del CLT, incluyendo datos específicos de paneles fabricados en Chile con de pino radiata. Posteriormente, en la sección 6.2, se abordan los requerimientos y el flujo normativo²¹, junto con herramientas de simulación disponibles que permiten evaluar el desempeño higrotérmico, asegurando que las estructuras cumplan con los estándares necesarios.

-
19. Pese a que los sobrecimientos también se consideran parte de la envolvente y requieren de aislación térmica, no se detallan en este capítulo ya que no se suelen materializar en CLT.
 20. Una vez dentro de la página web de DITEC desplácese a la sección “Eficiencia energética”.
 21. Este capítulo se redactó utilizando la normativa chilena vigente a la fecha de publicación de esta guía. Para referencias con fecha, sólo se aplica la edición citada. Para referencias sin fecha se aplica la última edición del documento referenciado.

Los conceptos y principios presentados pretenden abarcar recomendaciones y en ningún caso son exhaustivos o normativos, a no ser que se explique lo contrario. El diseño de cada solución para un proyecto en particular es responsabilidad del proyectista, quien debe ejercer su criterio justificado, pudiendo apoyarse en las recomendaciones teóricas expuestas en el presente capítulo.

6.1 DESEMPEÑO HIGROTÉRMICO INHERENTE DEL CLT

Entre los distintos sistemas constructivos en madera, el CLT se destaca por sus cualidades higrotérmicas. A diferencia del entramado ligero, que presentan múltiples perforaciones por sus clavados perimetral e interior, el CLT está compuesto de paneles macizos y uniformes, que minimizan estos puntos críticos, reduciendo las posibles filtraciones de aire y humedad. Además, su estructura de capas cruzadas proporciona mayor estabilidad dimensional, disminuyendo notoriamente la hinchazón y merma frente a cambios de humedad, evitando así la separación de los elementos en la edificación.

Esta sección aborda las propiedades higrotérmicas propias de los paneles de CLT. Estas propiedades permiten determinar su comportamiento higrotérmico en distintas soluciones y condiciones climáticas. A continuación, se exponen los datos necesarios para calcular el traspaso de calor (sección 6.1.1), la difusión de vapor (sección 6.1.2) y la inercia térmica (sección 6.1.3).

6.1.1 Traspaso de calor: conductividad λ , resistencia R y transmitancia térmica U

La conductividad térmica es una propiedad física intrínseca de los materiales que mide la capacidad de conducir calor. Si bien el CLT se beneficia de la mayoría de las propiedades inherentes de la especie con la que se fabrica, esto no necesariamente ocurre con la conductividad térmica.

El Anexo G de la NCh853-2021 indica que la madera aserrada de pino radiata tiene un valor λ de 0,104 [W/m·K]. Sin embargo, Felmer et al. (2022) determinaron experimentalmente la conductividad térmica de paneles de CLT fabricados en Chile con pino radiata, obteniendo como resultado un $\lambda=0,12$ [W/m·K], ligeramente mayor al indicado en la normativa nacional. Al ser un valor determinado experimentalmente en paneles de CLT fabricados en Chile y ser más conservador que el valor normativo, la presente guía utiliza esta conductividad térmica como referencia. De todas formas, este valor representa una baja conductividad térmica en comparación a otros materiales tradicionales, como el hormigón armado (1,63 [W/m·K]) y el acero (58 [W/m·K])²², lo que convierte al CLT en un material eficiente desde el punto de vista del aislamiento térmico. Cabe mencionar, que la empresa europea Stora Enso también reporta un valor de conductividad térmica de $\lambda=0,12$ [W/m·K] para sus paneles fabricados con la especie pícea (*norway spruce*)²³ (Stora Enso, 2022).

A partir de la conductividad térmica del material, su resistencia térmica (R) se determina según la expresión (6.1). Es importante mencionar que el adhesivo entre capas no afecta significativamente en la resistencia térmica de los paneles de CLT (FPIInnovations, 2019b) Por otra parte, la transmitancia térmica (U) es el inverso de la resistencia térmica y se determina según la expresión (6.2).

$$(6.1) \quad R = \frac{d}{\lambda}$$

$$(6.2) \quad U = \frac{1}{R}$$

en que:

R = resistencia térmica, en [m²·K/W];

U = transmitancia térmica, en [W/ m²·K];

d = espesor de la capa de material en el componente, en [m];

λ = conductividad térmica de diseño del material, en [W/m·K].

22. Valores según NCh853-2021.

23. Al igual que el pino radiata, la pícea es una especie conífera y tiene una densidad media de ρ_{12} entre 405 y 420 [kg/m³].

La Tabla 6.1 presenta valores de resistencia y transmitancia térmica para distintos espesores de CLT, calculados con la conductividad térmica $\lambda=0,12$ [W/m·K] obtenida experimentalmente.

6.1.2 Difusión de vapor: permeabilidad δ , factor de resistencia μ , permeancia W y resistencia al vapor de agua (Z_p)

Similar a la conductividad térmica, la permeabilidad al vapor de agua δ es una propiedad intrínseca de los materiales que mide la facilidad de un material para dejar pasar el vapor a través de su masa. Al normalizar este valor por la permeabilidad al vapor de agua del aire δ_a , se obtiene el factor de resistencia al vapor de agua μ de un material, factor adimensional que permite comparar fácilmente la permeabilidad de distintos materiales.

Si bien el adhesivo entre capas no afecta el traspaso de calor, este sí tiene una influencia relevante y favorable para la difusión de vapor. Al igual que en otros productos encolados de madera, la interfaz de adhesivo tiene un mayor factor de resistencia al vapor (μ) que la madera aserrada, lo que genera una barrera de vapor en cada interfaz del panel. Es decir, a mayor número de capas del panel de CLT mayor factor de resistencia al vapor μ . Por otra parte, este factor es sensible al contenido de humedad de la madera, incrementando a medida que se disminuye la humedad (Stora Enso, 2022).

El informe de ensayo N°1596862 de (DICTUC S. A., 2023), a solicitud del Centro de Innovación en Madera UC, reporta el ensayo de una probeta de CLT de 3 capas de pino radiata fabricada en Chile de 80 [mm] de espesor, para determinar las propiedades de transmisión de vapor de agua según la NCh2457. Como resultado, se obtuvo una permeabilidad promedio $\delta=1,73\times10^{-12}$ [kg/m²·s·Pa] y un factor de resistencia al vapor de agua $\mu=128$ [-].

Al comparar este valor con el factor de resistencia al vapor de agua en estado seco de la Tabla 3 de la ISO10456, en que se reporta que la madera con densidad ρ_{12} entre 450 y 500 [kg/m³] tiene un $\mu=50$, se evidencia el aporte de la interfaz de la línea de cola en dificultar el paso del vapor, acercándose más a los valores reportados para tableros de terciado²⁴. Cabe mencionar que la empresa europea Stora Enso reporta un factor de resistencia al vapor de agua de $\mu=156$ [-]²⁵ para un panel de 3 capas fabricado con la especie pícea (*norway spruce*) (Stora Enso, 2022).

A partir de estos valores, es posible determinar la permeancia al vapor de agua W según la expresión (6.3) y la resistencia a la difusión de vapor de agua Z_p según la expresión (6.4).

$$(6.3) \quad W = \frac{\delta}{d}$$

$$(6.4) \quad Z_p = \frac{1}{W}$$

en que:

W = permeancia al vapor de agua, en [kg/m²·s·Pa];

Z_p = resistencia a la difusión de vapor de agua, en [m²·s·Pa/kg];

d = espesor de la capa de material en el componente, en [m];

δ = permeabilidad al vapor de agua, en [kg/m²·s·Pa].

La Tabla 6.1 presenta valores de permeancia y resistencia al vapor para distintos espesores de CLT, calculados con la permeabilidad al vapor de agua $\delta=1,73\times10^{-12}$ obtenida experimentalmente. Cabe mencionar, que estos valores son conservadores para paneles de CLT de más de 3 capas, ya que estos tendrán una mayor cantidad de interfaces de línea de cola y por ende una menor permeabilidad.

24. Según ISO10456 un terciado de 450 [kg/m³] tiene un factor $\mu=150$.

25. Calculado según un contenido de humedad de 11,3%.

TABLA 6.1 – Propiedades térmicas y de difusión de vapor para distintos espesores de CLT (elaboración propia).

Espesor t_{CLT} [mm]	Propiedades térmicas		Propiedades de difusión de vapor		
	R $\left[\frac{m^2 \cdot K}{W}\right]$	U $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$	W $\left[10^{-11} \frac{kg}{m^2 \cdot s \cdot Pa}\right]$	Z_p $\left[\frac{MN \cdot s}{g}\right]$	
80	0,67	1,50	2,16	0,46	46
90	0,75	1,33	1,92	0,52	52
100	0,83	1,20	1,73	0,58	58
110	0,92	1,09	1,57	0,64	64
120	1,00	1,00	1,44	0,69	69
130	1,08	0,92	1,33	0,75	75
150	1,25	0,80	1,15	0,87	87
160	1,33	0,75	1,08	0,92	92
170	1,42	0,71	1,02	0,98	98
180	1,50	0,67	0,96	1,04	104
200	1,67	0,60	0,87	1,16	116
210	1,75	0,57	0,82	1,21	121
240	2,00	0,50	0,72	1,39	139
250	2,08	0,48	0,69	1,45	145
280	2,33	0,43	0,62	1,62	162
300	2,50	0,40	0,58	1,73	173

NOTA Para los cálculos se debe utilizar el espesor en [m]. $d=t_{CLT}/10^3$.

Estos valores se utilizan para estimar el comportamiento higrotérmico de un elemento o solución constructiva y prevenir problemas de condensación intersticial y superficial. Así mismo, permite evaluar la pertinencia de incorporar una membrana de vapor o la elección correcta de las barreras de protección, para asegurar una gestión eficiente del vapor.

La NCh1980 define como **barrera de vapor** a toda lámina o capa que presenta una resistencia a la

difusión de vapor de agua Z_p comprendida entre 10 y 230 [MN·s/g]. En base a esta definición el CLT siempre será considerado una barrera de vapor por sí solo, sin la necesidad de requerir una membrana de vapor adicional. De hecho, incluir membranas de vapor en soluciones constructivas de CLT puede ser incluso contraproducente, al dificultar la evaporación y secado de un panel que eventualmente haya quedado expuesto a la humedad (FPIinnovations, 2019).

6.1.3 Inercia térmica: admitancia térmica Y

La inercia térmica es la capacidad de una construcción de absorber, almacenar y liberar calor sensible y/o latente en el medioambiente en que se encuentra, siendo una estrategia pasiva para el confort térmico en recintos interiores. A modo general y cualitativo, las propiedades de los materiales que definen si posee una alta inercia térmica son: (1) una conductividad térmica adecuada²⁶; (2) un calor específico alto; (3) un espesor suficiente; y (4) una densidad alta. En este sentido, los materiales pétreos son aquellos que tienen la mayor inercia térmica. En cuanto a la madera, su inercia térmica no es un atributo destacable, debido a su baja densidad

y conductividad, por lo que se sugiere combinarla con otros materiales si se quiere sacar provecho de la inercia térmica en un proyecto.

Uno de los métodos para estudiar el efecto de la inercia térmica es el modelo dinámico de la admitancia térmica propuesto por (CIBSE, n.d.). Este modelo define la admitancia térmica como una propiedad de los materiales que representa la tasa de transferencia de calor entre una construcción y el medioambiente en el que se encuentra, a lo largo de un periodo de tiempo, generalmente aplicado a un ciclo de 24 horas. La Tabla 6.2 indica la definición de los parámetros más relevantes del método de la admitancia térmica del CIBSE.

TABLA 6.2 - Parámetros del método de admitancia térmica

Parámetro	Símbolo y Unidad	Definición
Admitancia térmica (admittance)	Y [W/m ² .K]	La capacidad de un material o estructura para intercambiar calor con su entorno.
Tiempo de entrega (time lead)	ω [hr]	Lapso necesario para que el calor que ha sido absorbido por un material sea liberado al ambiente.
Factor de decremento (decrement factor)	f [-]	Coeficiente que mide la atenuación de la amplitud térmica a medida que el calor se transfiere a través de un material.
Tiempo de retardo (time lag)	Φ [hr]	Período de tiempo que tarda un material en experimentar un cambio de temperatura en su superficie. Rapidez en que la superficie se estabiliza después de un estímulo térmico externo.

En base a este método analítico, el CLT tiene una admitancia térmica entre 1,83 y 2,06 [W/m².K], un tiempo de entrega entre 2,10 y 2,38 horas, un factor de decremento entre 0,90 y 0,11 y un tiempo de retardo entre 2,65 y 15,43 horas, para paneles entre 80 y 300 [mm] de espesor²⁷.

Cabe mencionar que este no es el único método para evaluar la inercia térmica y mientras no exista normativa que lo especifique, el diseñador es libre de utilizar el método que estime conveniente.

26. Se entiende por adecuada “ni muy alta ni muy baja”, dependiendo también del diseño.

27. A modo de referencia, con este mismo método un muro de hormigón armado de 200 [mm] tiene un $Y=5,77$ [W/m².K], $\omega=0,92$ [-], $f=0,50$ [-] y $\Phi=5,74$ horas.

6.2 REQUERIMIENTOS NORMATIVOS

6.2.1 Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones

Tener claridad sobre el uso del proyecto es el primer eslabón para determinar si la edificación tiene requerimientos higrotérmicos obligatorios u opcionales. El artículo 2.1.24 de la OGUC define los 6 tipos de usos de suelo para el territorio nacional: residencial, equipamiento, actividades productivas, infraestructura, espacio público y área verde; detallando en los artículos siguientes a qué se refiere cada uno de estos usos.

Posteriormente, el artículo 4.1.10 define las exigencias de acondicionamiento térmico y cuáles tipos de uso las deben cumplir. Históricamente este artículo se limitó únicamente al uso residencial. Sin embargo, en mayo de 2024 se publicó el Decreto 15 (2024) que actualiza el artículo 4.1.10 de la OGUC aumentando las exigencias térmicas en busca de un mejor estándar e incluyendo por primera vez exigencias mínimas para establecimientos de educación y salud (uso de equipamiento)²⁸.

Entre los principales cambios que se presentan en las exigencias de la normativa, se establece un aumento de los requerimientos sobre el comportamiento térmico de techos, muros, pisos ventilados, así como nuevas exigencias para puerta opacas y sobrecimientos. Por otro lado, los elementos que constituyen la envolvente de la edificación, como

muros perimetrales, techumbre y piso ventilado, deben verificar el riesgo de condensación superficial e intersticial, para asegurar un adecuado rendimiento higrotérmico.

Otra actualización relevante en la OGUC es que se incluyen nuevos requisitos para la hermeticidad²⁹ de las edificaciones. Por un lado, establece los estándares y métodos para cumplir con la clase de infiltración y de permeabilidad de aire requerida dependiendo de la provincia que se ubique la edificación. Por otro lado, exige e indica el método de acreditación para el uso de sistemas de ventilación que asegure una tasa de ventilación no menor a las indicadas en la NCh3308 y NCh3309.

En esta sección, se abordan solo los temas relacionados directamente con el rendimiento de los paneles de CLT, sin profundizar en los aspectos que están condicionados por la morfología del espacio arquitectónico y la calidad de la construcción. En este sentido, no se tratan temas como la orientación de la edificación, infiltración de aire y ventilación. En caso de que el usuario quiera revisar en mayor profundidad conceptos del diseño de hermeticidad, se recomienda el documento “[Estudio y guía de recomendaciones para la hermeticidad al paso del aire](#)” (CIM UC, 2023).

La Figura 6.1 presenta un marco conceptual del flujo normativo del acondicionamiento térmico, destacando aquellos aplicables al CLT y profundizados en las secciones 6.2.3 y 6.2.4, sobre el aislamiento térmico y la condensación, respectivamente.

-
28. Estas nuevas exigencias entrarán en vigor en noviembre de 2025, por lo que, a la fecha de redacción de este guía, no están incluidas en la OGUC. No obstante, este capítulo trabaja con los requerimientos térmicos del Decreto 15 (2024) y se recomienda en las nuevas construcciones aplicar este estándar con antelación.
 29. La hermeticidad es la capacidad para controlar las infiltraciones asegurando que el aire fluya solo a través de los sistemas de ventilación controlados.

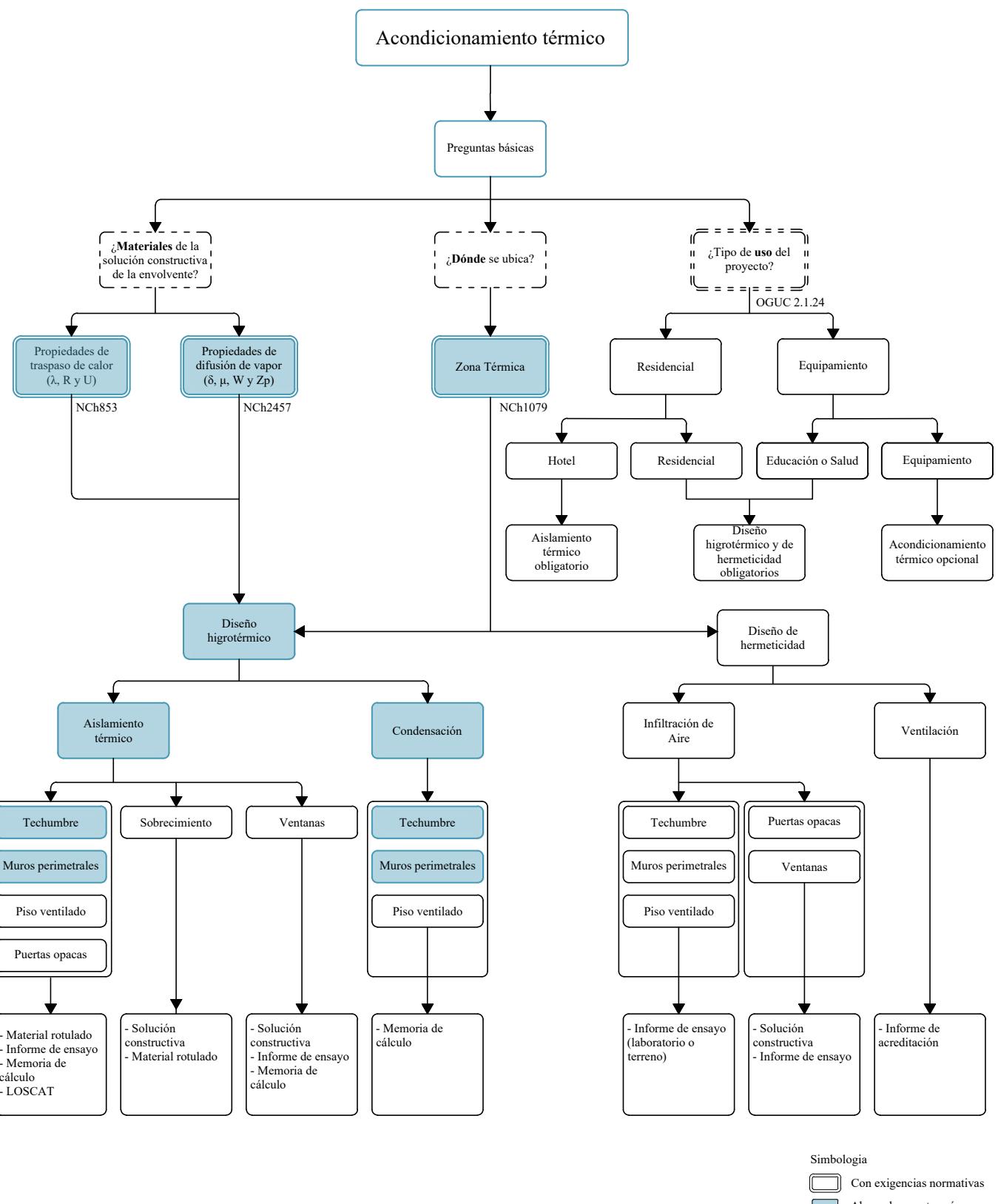


Figura 6.1 - Marco conceptual de los requerimientos normativos para el acondicionamiento térmico (elaboración propia)

TABLA 6.3 - NORMATIVAS CHILENAS PARA EL DISEÑO HIGROTÉRMICO SEGÚN SU ALCANCE.

Alcance	Normas
Normas generales de diseño higrotérmico	NCh1079, NCh2251 y NCh2802
Estimar la aislación térmica o condensación de elementos con métodos de cálculo	NCh853, NCh1973, NCh1980, NCh3117 y serie NCh3137
Medir la aislación térmica o condensación de elementos en laboratorio	NCh850, NCh851, NCh2457 y serie NCh3076

NOTA: En negrita las normas oficiales.

6.2.2 NCh1079 - Arquitectura y construcción – Zonificación climática y térmica para el diseño de edificaciones

Tal como se mencionó en la sección 6.2.1, los requisitos térmicos aumentaron su exigencia en la OGUC, siendo uno de los aspectos más evidentes la actualización de la zonificación térmica.

La reglamentación pasada clasificaba numéricamente las zonas térmicas de la 1 a la 7, de acuerdo con los planos de zonificación térmica aprobados por resoluciones del Ministerio de Vivienda y Urbanismo. En cambio, la nueva clasificación hace

referencia directa a la (NCh1079), diferenciando las zonas en forma alfabética de la A hasta la I, agregando dos zonas adicionales³⁰. Más relevante que el cambio de identificación, son los valores de transmitancia térmica U máxima y resistencia térmica total R_t mínima de la Tabla 1 del artículo 4.1.10 (replicada en la Tabla 6.4), particularmente para el complejo de muros perimetrales en que la exigencia es cercana al doble de la pasada. Cabe destacar también que ciertas comunas de la zona sur de Chile cuentan con Planes de Descontaminación Atmosférica (PDA), por lo que requieren exigencias higrotérmicas y de hermeticidad mayores.

TABLA 6.4 – Transmitancia térmica U máxima y resistencia térmica R_t mínima para complejos de techumbre, muros perimetrales, piso ventilado y puertas opacas

Zona Térmica	Techumbre		Muros Perimetrales		Piso Ventilado		Puertas Opacas	
	U [W / m ² ·K]	R_t [m ² ·K/W]	U [W / m ² ·K]	R_t [m ² ·K/W]	U [W / m ² ·K]	R_t [m ² ·K/W]	U [W / m ² ·K]	R_t [m ² ·K/W]
A	0,84	1,19	2,10	0,48	3,60	0,28	-	-
B	0,47	2,13	0,80	1,25	0,70	1,43	1,70	0,59
C	0,47	2,13	0,80	1,25	0,87	1,15	1,70	0,59
D	0,38	2,63	0,80	1,25	0,60	1,67	1,70	0,59
E	0,33	3,03	0,60	1,67	0,60	1,67	1,70	0,59
F	0,28	3,57	0,45	2,22	0,50	2,00	1,70	0,59
G	0,28	3,57	0,40	2,50	0,39	2,56	1,70	0,59
H	0,25	4,00	0,30	3,33	0,32	3,13	1,70	0,59
I	0,25	4,00	0,35	2,86	0,32	3,13	1,70	0,59

30. Los mapas de zonificación térmica nacional, además de estar incluidos en la NCh1079, se pueden encontrar en la sección “Eficiencia energética” de la página web de DITEC.

Para estructuras de CLT los complejos más relevantes son techumbre y muros perimetrales. En cuanto a los pisos ventilados, si bien es factible materializarlos en CLT, esto es poco común, siendo ampliamente más utilizada la alternativa de radiales de hormigón, tanto por razones estructurales como por durabilidad, por lo que no se abarcan en esta guía. No obstante, los mismos principios y métodos de diseño higrotérmico son extrapolables a los requerimientos de pisos ventilados.

6.2.3 NCh853 - Componentes y elementos para edificación - Resistencia térmica y transmitancia térmica - Métodos de cálculo

Para demostrar el cumplimiento de la transmitancia o resistencia térmica exigida en la Tabla 6.4 para muros perimetrales y techumbre, se puede optar entre cuatro alternativas:

- i. Incorporar un material rotulado según la NCh2251;
- ii. Realizar un informe de ensayo según NCh851;
- iii. Realizar una memoria de cálculo según NCh853; o
- iv. Adoptar una solución del Listado Oficial de Soluciones Constructivas para Acondicionamiento Térmico (MINVU).

La presente sección desarrolla y exemplifica la alternativa de memoria de cálculo según NCh853, por ser la opción más genérica y con mayor espectro de posibilidades para el CLT.

En su forma más simple, un componente estará constituido por 2 o más **capas térmicamente homogéneas** perpendiculares al flujo de calor, en cuyo caso la resistencia térmica total del componente,

R_{tot} , es la suma de la resistencia térmica de cada capa homogénea más el aporte de las resistencias superficiales según la siguiente expresión:

$$(6.5) \quad R_{tot} = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se}$$

en que:

R_{si} = resistencia superficial interior, en $[m^2 \cdot K/W]$;

R_n = resistencia de diseño de la capa n, en $[m^2 \cdot K/W]$;

R_{se} = resistencia superficial exterior, en $[m^2 \cdot K/W]$.

Las soluciones constructivas con CLT que pertenezcan a la envolvente de una edificación prácticamente siempre estarán compuestos por 2 o más capas, en donde es altamente probable que una o más de ellas sean **capas heterogéneas** por el uso de aislantes o cámaras ventiladas. Debido a ello, para el cálculo de la transmitancia térmica total de la solución constructiva se debe seguir la metodología de la NCh853 que combina capas homogéneas con capas heterogéneas³¹.

Siguiendo esta metodología, la resistencia térmica total de la solución se determina según la expresión:

$$(6.6) \quad R_{tot} = \frac{R_{tot,upper} + R_{tot,lower}}{2}$$

en que:

$R_{tot,upper}$ = límite superior de la resistencia térmica total, calculado como componente por secciones, según (6.8), en $[m^2 \cdot K/W]$;

$R_{tot,lower}$ = límite inferior de la resistencia térmica total, calculado como componente por capas, según (6.10), en $[m^2 \cdot K/W]$.

31. Sección 5.7.2 “Resistencia térmica total de un componente de la edificación constituido por capas homogéneas y heterogéneas”, en la edición de 2021.

Para determinar estos valores, primero es necesario reconocer las *m secciones* y *n capas* que tiene el componente térmicamente heterogéneo, como se ilustra en la Figura 6.2.

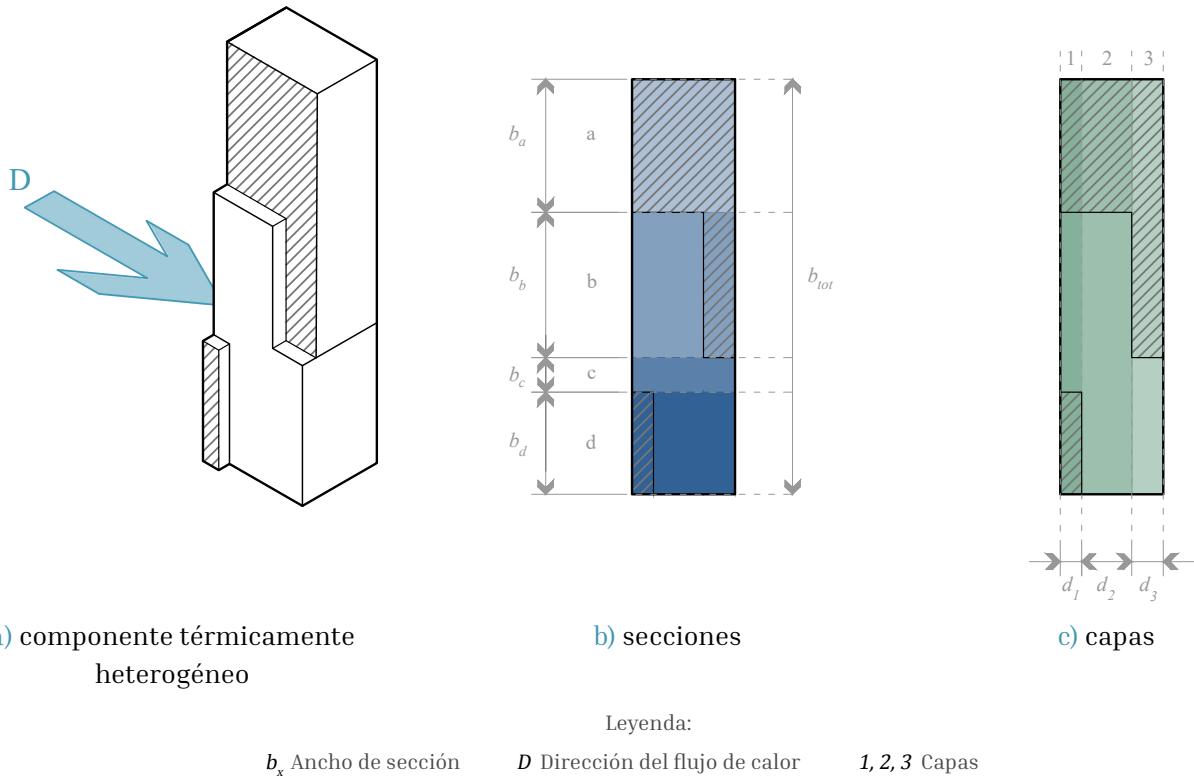


Figura 6.2 - Método de cálculo por secciones y capas de un componente constituido por capas homogéneas y heterogéneas (adaptado de NCh853)

Para determinar el límite superior de la resistencia térmica total $R_{tot,upper}$, se analiza cada sección (ver Figura 6.2b) y los materiales que la componen³². Entonces, se debe determinar primero la resistencia térmica total de cada sección, $R_{tot,i}$, según la expresión (6.7)³³ y luego realizar una suma ponderada de todas las secciones según la expresión (6.8).

$$(6.7) \quad R_{tot,i} = R_{si} + \left(\sum_{k=1}^{p_i} R_k \right) + R_{se}$$

$$(6.8) \quad \frac{1}{R_{tot,upper}} = \sum_{i=1}^m \frac{f_i}{R_{tot,i}}$$

en que:

$R_{tot,i}$ = resistencia térmica total de la sección *i*, en [m²·K/W].

R_k = resistencia térmica del material *k*, en [m²·K/W].

p_i = cantidad de materiales en la sección *i*;

f_i = fracción de área de la sección *i*, b_i/b_{tot} (ver Figura 6.2b);

m = cantidad de secciones.

32. En soluciones constructivas con CLT bien diseñadas, rara vez habrán más de 3 secciones.

33. La expresión (6.7) es igual a la (6.5). Se replica y se adapta para mayor facilidad para el usuario.

Por otra parte, para determinar el límite inferior de la resistencia térmica total $R_{tot,lower}$, se analiza cada capa (ver Figura 6.2c) y los materiales que la componen³⁴. Entonces, se debe determinar primero la resistencia térmica equivalente de cada capa, R_j , según la expresión (6.9) y luego sumar todas las capas según la expresión (6.10)³⁵:

$$(6.9) \quad \frac{1}{R_j} = \sum_{k=1}^{p_j} \frac{f_k}{R_{kj}}$$

$$(6.10) \quad R_{tot,lower} = R_{si} + \left(\sum_{j=1}^n R_j \right) + R_{se}$$

en que:

- R_j = resistencia térmica equivalente de la capa j ;
- f_k = fracción de área del material k en la capa j , (ver Figura 6.2c);
- R_{kj} = resistencia térmica del material k considerando el espesor de la capa j , en $[m^2 \cdot K/W]$;
- p_j = cantidad de materiales en la capa j ;
- n = cantidad de capas.

Alternativamente, la NCh853 proporciona otra manera de determinar el límite inferior $R_{tot,lower}$ basado en una conductividad térmica equivalente de cada capa, se sugiere revisar la norma.

Este método para determinar la resistencia térmica total de la solución no es válido para casos donde la relación entre el límite superior y el límite inferior de la resistencia térmica excede 1,5 ($R_{tot,upper}/R_{tot,lower} > 1,5$).

6.2.3.1 Ejemplo aplicado en muro perimetral con CLT

El siguiente ejemplo consiste en determinar la resistencia térmica de una solución constructiva de muro perimetral compuesto por un panel de CLT de 90 [mm] de espesor, con lana de vidrio de 25 [mm] y 11 [kg/m³] y montantes de 41x41 [mm] espaciados cada 400 [mm] para la instalación de una fachada genérica³⁶. La cámara de aire de 16 [mm] es ventilada

y se consideran las resistencias superficiales $R_{si}=0,13$ [m²·K/W] y $R_{se}=0,04$ [m²·K/W] para flujo horizontal, según NCh853³⁷. La Tabla 6.5 presenta las propiedades térmicas de los materiales de la solución constructiva. Notar que el ancho representativo (b_{tot}) queda definido por la separación de los montantes.

TABLA 6.5 - Propiedades de materiales del muro perimetral de ejemplo.

Material	Abreviación	ancho (b) [mm]	espesor (d) [mm]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
Lana de Vidrio 25 [mm] de 11 [kg/m ³]	Lv	359	25	0,042	0,595
Montante de pino radiata 41x41 [mm]	Mo	41	41	0,104	0,394
CLT de pino radiata	CLT	400	90	0,12	0,750

34. En soluciones constructivas con CLT bien diseñadas, rara vez habrán más de 2 materiales en 1 capa.

35. La expresión (6.10) es igual a la (6.5). Se replica y se adapta para mayor facilidad para el usuario.

36. Esta solución carece de membrana de humedad únicamente por fines de simplificación para el ejemplo. Pese a que no aporta resistencia térmica, es importante incluirla por fines de durabilidad (ver sección 8.2).

37. Tabla 7 “Resistencia superficiales convencionales”, en la edición de 2021.

La Figura 6.3 ilustra la solución constructiva y la identificación de sus secciones y capas. La Tabla 6.6 presenta los parámetros para el cálculo del límite superior, mientras que la Tabla 6.7 presenta aquellos para el cálculo del límite inferior.

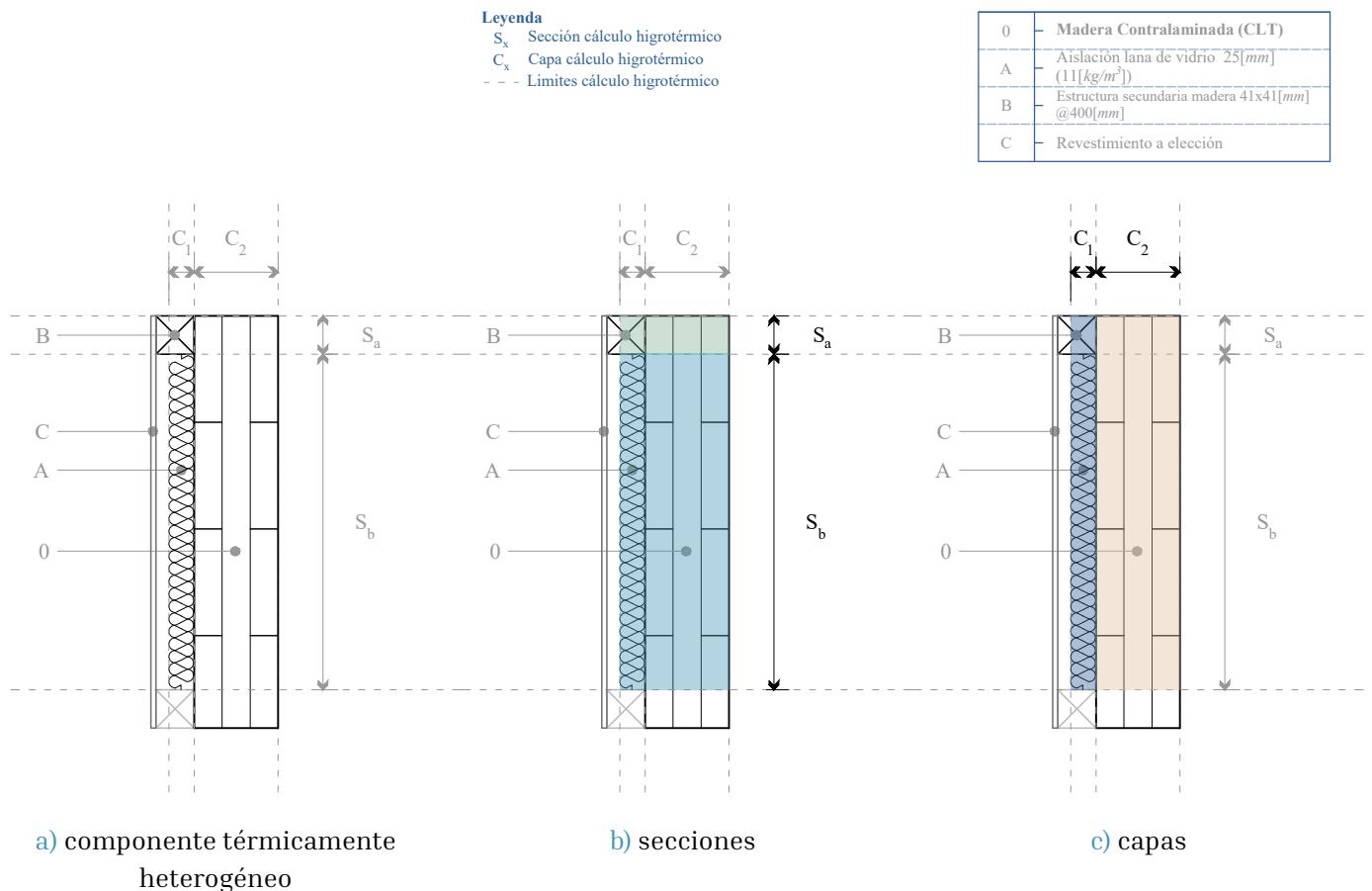


Figura 6.3 - Ejemplo de cálculo de resistencia térmica de muro perimetral de CLT.

TABLA 6.6 - Parámetros para el cálculo del límite superior de resistencia térmica total del muro perimetral de ejemplo.

Sección (i)	b_i	Material 1	Material 2	$R_{tot,i}^1$	f_i	$f_i/R_{tot,i}$
a	41	Mo	CLT	1,314	0,103	0,078
b	359	Lv	CLT	1,515	0,898	0,592

Nota 1: según ecuación (6.7)

Como resultado de la expresión (6.8), se obtiene un valor del límite superior de la resistencia térmica total $R_{tot,upper}=1,49$ [m²K/W].

TABLA 6.7 - Parámetros para el cálculo del límite inferior de resistencia térmica total del muro perimetral de ejemplo.

Capa (j)	d_j [mm]	Material 1				Material 2				R_j^1 [m ² K/W]
		Abr.	f_k	λ_k [W/mK]	R_{kj} [m ² K/W]	Abr.	f_k	λ_k [W/mK]	R_{kj} [m ² K/W]	
1	25	Mo	0,103	0,104	0,240	Lv	0,898	0,042	0,595	0,517
2	90	CLT	1,000	0,120	0,750					0,750

Nota 1: según ecuación (6.9)

Como resultado de la expresión (6.10), se obtiene un valor del límite inferior de la resistencia térmica total $R_{tot,lower}=1,44$ [m²K/W]. Como $R_{tot,upper}/R_{tot,lower}=1,04<1,5$ el método es válido para la solución, entonces la resistencia térmica total de la solución según la expresión (6.6) resulta $R_{tot}=1,46$ [m²K/W]. Según los valores límites de la Tabla 6.4, esta solución constructiva es cumple los requisitos hasta la zona térmica D.

6.2.4 NCh1973 – Comportamiento higrotérmico de elementos y componentes de construcción - Temperatura superficial interior para evitar la humedad superficial crítica y la condensación intersticial - Métodos de cálculo

A diferencia de la demostración del cumplimiento de la transmitancia o resistencia térmica, para verificar que no existe el riesgo de condensación superficial e intersticial (ver Figura 6.4) la única alternativa permitida por la OGUC, es mediante memoria de cálculo según NCh1973. Este análisis corresponde a un cálculo simplificado que es válido solo para evaluar el flujo de vapor desde el exterior al interior del recinto.

Si bien el procedimiento descrito en la NCh1973 es un cálculo simplificado, la física detrás de la transferencia de vapor es compleja. Para la realización de este cálculo y evaluar el riesgo de condensación

para las construcciones, el MINVU ha elaborado una planilla de cálculo en formato Excel, disponible en la página web de [DITEC](#)³⁸.

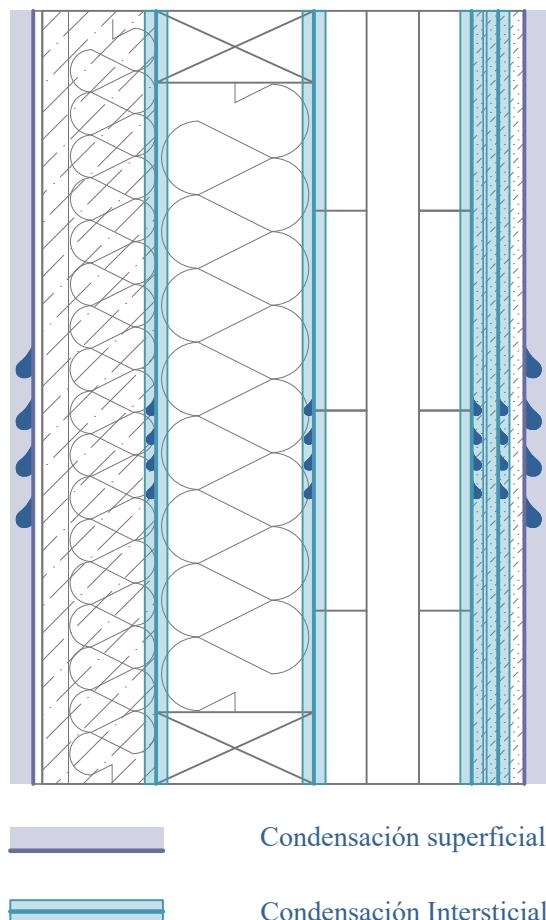


Figura 6.4 - Condensación superficial e intersticial

38. Una vez dentro de la página web de DITEC desplácese a la sección “Eficiencia energética”, abra la pestaña “Planes de Descontaminación Atmosférica” y luego la pestaña de “Herramientas digitales cálculo condensación, ventilación y transmitancia térmica”.

6.2.4.1 Ejemplo aplicado en muro perimetral con CLT

Para el siguiente ejemplo se compara la influencia de instalar la aislación por el interior del CLT (caso base) o por el exterior del CLT (caso proyectado) utilizando la solución constructiva del ejemplo 6.2.3.1³⁹. El hecho de “cambiar” el aislante del exterior al interior en la solución constructiva del ejemplo anterior, manteniendo las dimensiones de los elementos, tiene ciertas consecuencias si se quieren comparar soluciones constructivas lógicas:

- i. El aislante por el interior no puede quedar a la vista, por lo que es necesario una placa adicional. Para este ejemplo se opta por un OSB de 11,1 [mm], por su resistencia a la difusión de vapor.
 - ii. Al mantener las dimensiones de montante y aislante, se genera una cámara de aire no ventilada por el interior, que aporta resistencia térmica.
 - iii. El CLT no puede quedar expuesto al exterior (ver Capítulo 8), por lo que de todas formas se debe generar una estructura secundaria con montantes que soporten el revestimiento genérico.
39. Esta solución carece de membrana de humedad únicamente por fines de simplificación para el ejemplo anterior de resistencia térmica. Pese a que no aporta resistencia térmica, es importante incluirla por fines de durabilidad (ver sección 8.2) y, dependiendo de su permeabilidad, influye en el análisis de condensación.

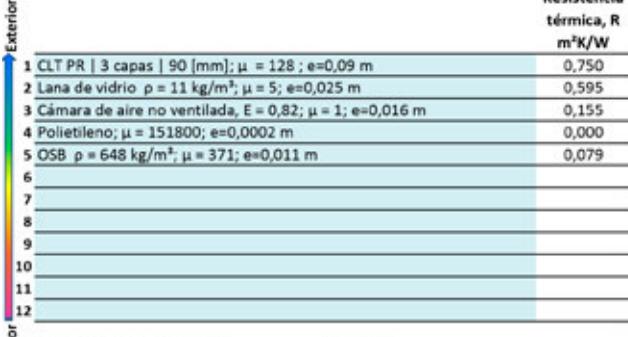
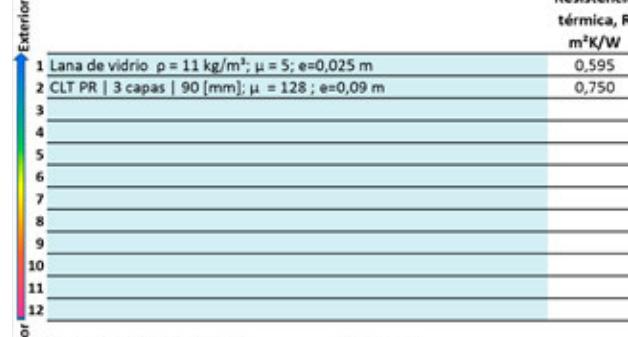
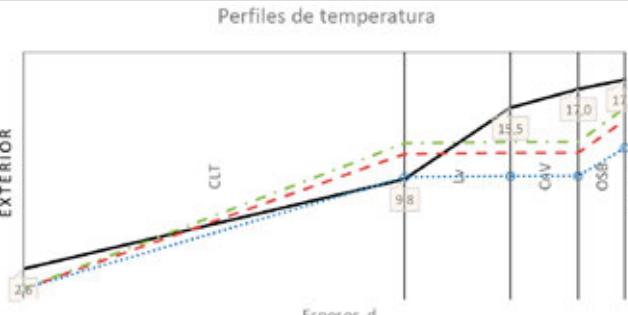
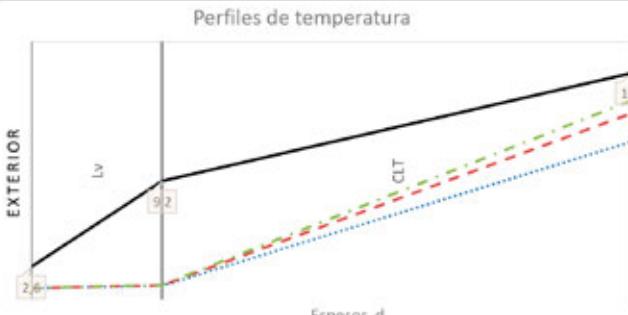
La ubicación se supone en la Provincia de Santiago, con condiciones exteriores de 2,2 °C y 92% de humedad relativa (mes de julio), condiciones interiores de 19 °C y humedad relativa máxima aceptable $\Phi_{sicr}=1,0$. La Tabla 6.8 presenta el desarrollo para la sección del montante y la Tabla 6.9 el desarrollo de la sección del aislante.

En la sección del montante, del resultado presentado en la Tabla 6.8 se obtiene que en la solución con aislación por dentro se generará condensación intersticial en el panel de CLT para una humedad relativa interior igual o mayor 82%, mientras que, para la solución con aislante por el exterior, ocurrirá condensación superficial a partir de un 92%. La exigencia normativa indica diseñar para $\phi_i=80\%$ (NCh1973,2014), por lo que ambas alternativas cumplen el requerimiento, estando con mayor holgura la solución con aislante por el exterior.

TABLA 6.8 - Sección de menor resistencia térmica: puente térmico en montante.

Caso Base (aislación por dentro)		Caso Proyectado (aislación por fuera)																																																																																																																								
Datos de entrada		Datos de entrada																																																																																																																								
<table border="1"> <tr><td>Exterior</td><td>Interior</td></tr> <tr><td>1 CLT PR 3 capas 90 [mm]; $\mu = 128$; $e=0,09$ m</td><td>0,750</td></tr> <tr><td>2 Pino insignie $\rho = 410 \text{ kg/m}^3$; $\mu = 64$; $e=0,041$ m</td><td>0,394</td></tr> <tr><td>3 OSB $\rho = 648 \text{ kg/m}^3$; $\mu = 371$; $e=0,011$ m</td><td>0,079</td></tr> <tr><td>4</td><td></td></tr> <tr><td>5</td><td></td></tr> <tr><td>6</td><td></td></tr> <tr><td>7</td><td></td></tr> <tr><td>8</td><td></td></tr> <tr><td>9</td><td></td></tr> <tr><td>10</td><td></td></tr> <tr><td>11</td><td></td></tr> <tr><td>12</td><td></td></tr> </table>		Exterior	Interior	1 CLT PR 3 capas 90 [mm]; $\mu = 128$; $e=0,09$ m	0,750	2 Pino insignie $\rho = 410 \text{ kg/m}^3$; $\mu = 64$; $e=0,041$ m	0,394	3 OSB $\rho = 648 \text{ kg/m}^3$; $\mu = 371$; $e=0,011$ m	0,079	4		5		6		7		8		9		10		11		12		<table border="1"> <tr><td>Exterior</td><td>Interior</td></tr> <tr><td>1 Pino insignie $\rho = 410 \text{ kg/m}^3$; $\mu = 64$; $e=0,041$ m</td><td>0,394</td></tr> <tr><td>2 CLT PR 3 capas 90 [mm]; $\mu = 128$; $e=0,09$ m</td><td>0,750</td></tr> <tr><td>3</td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td></td></tr> <tr><td>5</td><td></td></tr> <tr><td>6</td><td></td></tr> <tr><td>7</td><td></td></tr> <tr><td>8</td><td></td></tr> <tr><td>9</td><td></td></tr> <tr><td>10</td><td></td></tr> <tr><td>11</td><td></td></tr> <tr><td>12</td><td></td></tr> </table>		Exterior	Interior	1 Pino insignie $\rho = 410 \text{ kg/m}^3$; $\mu = 64$; $e=0,041$ m	0,394	2 CLT PR 3 capas 90 [mm]; $\mu = 128$; $e=0,09$ m	0,750	3		4		5		6		7		8		9		10		11		12																																																																				
Exterior	Interior																																																																																																																									
1 CLT PR 3 capas 90 [mm]; $\mu = 128$; $e=0,09$ m	0,750																																																																																																																									
2 Pino insignie $\rho = 410 \text{ kg/m}^3$; $\mu = 64$; $e=0,041$ m	0,394																																																																																																																									
3 OSB $\rho = 648 \text{ kg/m}^3$; $\mu = 371$; $e=0,011$ m	0,079																																																																																																																									
4																																																																																																																										
5																																																																																																																										
6																																																																																																																										
7																																																																																																																										
8																																																																																																																										
9																																																																																																																										
10																																																																																																																										
11																																																																																																																										
12																																																																																																																										
Exterior	Interior																																																																																																																									
1 Pino insignie $\rho = 410 \text{ kg/m}^3$; $\mu = 64$; $e=0,041$ m	0,394																																																																																																																									
2 CLT PR 3 capas 90 [mm]; $\mu = 128$; $e=0,09$ m	0,750																																																																																																																									
3																																																																																																																										
4																																																																																																																										
5																																																																																																																										
6																																																																																																																										
7																																																																																																																										
8																																																																																																																										
9																																																																																																																										
10																																																																																																																										
11																																																																																																																										
12																																																																																																																										
Espesor total de la solución: 142 [mm] Resistencia térmica total, R_t : 1,393 [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]		Espesor total de la solución: 131 [mm] Resistencia térmica total, R_t : 1,314 [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]																																																																																																																								
<input type="button" value="Limpiar tabla"/>		<input type="button" value="Limpiar tabla"/>																																																																																																																								
Resultados		Resultados																																																																																																																								
Perfiles de temperatura <p>Leyenda: Temperatura de rocío, según HR: 65% 75% - - 80% - - - Temperatura intersticial: —</p>		Perfiles de temperatura <p>Leyenda: Temperatura de rocío, según HR: 65% 75% - - 80% - - - Temperatura intersticial: —</p>																																																																																																																								
Verificación de condensación		Verificación de condensación																																																																																																																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th><th>Puntos de análisis</th><th>HR Cond.</th></tr> <tr> <th>HR interior, ϕ_i:</th><th>65%</th><th>75%</th><th>80%</th><th>82%</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Condensación superficial:</td><td>No</td><td>No</td><td>No</td><td>No</td></tr> <tr> <td>Res. Térmica caso base</td><td>1,393</td><td>1,393</td><td>1,393</td><td>1,393</td></tr> <tr> <td>Res. Térmica total min, $R_{t,min}$</td><td>0,325</td><td>0,482</td><td>0,619</td><td>0,695</td></tr> <tr> <td>Condensación intersticial:</td><td>No</td><td>No</td><td>No</td><td>Sí</td></tr> <tr> <td>Detalle de interfasas con condensación:</td><td colspan="4"></td></tr> <tr> <td>Superficie exterior</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td>Interfase 1</td><td></td><td></td><td>X</td><td></td></tr> <tr> <td>Interfase 2</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td>Superficie interior</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td>Nº Interfaces condensación:</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr> <td>Total:</td><td colspan="3">0 Interfases</td></tr> </tbody> </table>			Puntos de análisis	HR Cond.	HR interior, ϕ_i :	65%	75%	80%	82%	Condensación superficial:	No	No	No	No	Res. Térmica caso base	1,393	1,393	1,393	1,393	Res. Térmica total min, $R_{t,min}$	0,325	0,482	0,619	0,695	Condensación intersticial:	No	No	No	Sí	Detalle de interfasas con condensación:					Superficie exterior					Interfase 1			X		Interfase 2					Superficie interior					Nº Interfaces condensación:	0	0	0	1	Total:	0 Interfases			<table border="1"> <thead> <tr> <th></th><th>Puntos de análisis</th><th>HR Cond.</th></tr> <tr> <th>HR interior, ϕ_i:</th><th>65%</th><th>75%</th><th>80%</th><th>92%</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Condensación superficial:</td><td>No</td><td>No</td><td>No</td><td>Sí</td></tr> <tr> <td>Res. Térmica caso proyectado</td><td>1,314</td><td>1,314</td><td>1,314</td><td>1,314</td></tr> <tr> <td>Res. Térmica total min, $R_{t,min}$</td><td>0,325</td><td>0,482</td><td>0,619</td><td>1,643</td></tr> <tr> <td>Condensación intersticial:</td><td>No</td><td>No</td><td>No</td><td>Sí</td></tr> <tr> <td>Detalle de interfasas con condensación:</td><td colspan="4"></td></tr> <tr> <td>Superficie exterior</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td>Interfase 1</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td>Superficie interior</td><td></td><td></td><td></td><td>X</td></tr> <tr> <td>Nº Interfaces condensación:</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr> <td>Total:</td><td colspan="3">0 Interfases</td></tr> </tbody> </table>			Puntos de análisis	HR Cond.	HR interior, ϕ_i :	65%	75%	80%	92%	Condensación superficial:	No	No	No	Sí	Res. Térmica caso proyectado	1,314	1,314	1,314	1,314	Res. Térmica total min, $R_{t,min}$	0,325	0,482	0,619	1,643	Condensación intersticial:	No	No	No	Sí	Detalle de interfasas con condensación:					Superficie exterior					Interfase 1					Superficie interior				X	Nº Interfaces condensación:	0	0	0	1	Total:	0 Interfases		
	Puntos de análisis	HR Cond.																																																																																																																								
HR interior, ϕ_i :	65%	75%	80%	82%																																																																																																																						
Condensación superficial:	No	No	No	No																																																																																																																						
Res. Térmica caso base	1,393	1,393	1,393	1,393																																																																																																																						
Res. Térmica total min, $R_{t,min}$	0,325	0,482	0,619	0,695																																																																																																																						
Condensación intersticial:	No	No	No	Sí																																																																																																																						
Detalle de interfasas con condensación:																																																																																																																										
Superficie exterior																																																																																																																										
Interfase 1			X																																																																																																																							
Interfase 2																																																																																																																										
Superficie interior																																																																																																																										
Nº Interfaces condensación:	0	0	0	1																																																																																																																						
Total:	0 Interfases																																																																																																																									
	Puntos de análisis	HR Cond.																																																																																																																								
HR interior, ϕ_i :	65%	75%	80%	92%																																																																																																																						
Condensación superficial:	No	No	No	Sí																																																																																																																						
Res. Térmica caso proyectado	1,314	1,314	1,314	1,314																																																																																																																						
Res. Térmica total min, $R_{t,min}$	0,325	0,482	0,619	1,643																																																																																																																						
Condensación intersticial:	No	No	No	Sí																																																																																																																						
Detalle de interfasas con condensación:																																																																																																																										
Superficie exterior																																																																																																																										
Interfase 1																																																																																																																										
Superficie interior				X																																																																																																																						
Nº Interfaces condensación:	0	0	0	1																																																																																																																						
Total:	0 Interfases																																																																																																																									

TABLA 6.9 - Sección de mayor resistencia térmica: sección con aislante.

Caso Base (aislación por dentro)		Caso Proyectado (aislación por fuera)																																																																					
Datos de entrada		Datos de entrada																																																																					
																																																																							
Exterior	Interior	Exterior	Interior																																																																				
1 CLT PR 3 capas 90 [mm]; $\mu = 128$; $e=0,09$ m		1 Lana de vidrio; $\rho = 11 \text{ kg/m}^3$; $\mu = 5$; $e=0,025$ m																																																																					
2 Lana de vidrio; $\rho = 11 \text{ kg/m}^3$; $\mu = 5$; $e=0,025$ m		2 CLT PR 3 capas 90 [mm]; $\mu = 128$; $e=0,09$ m																																																																					
3 Cámara de aire no ventilada, $E = 0,82$; $\mu = 1$; $e=0,016$ m		3																																																																					
4 Polietileno; $\mu = 151800$; $e=0,0002$ m		4																																																																					
5 OSB $\rho = 648 \text{ kg/m}^3$; $\mu = 371$; $e=0,011$ m		5																																																																					
6		6																																																																					
7		7																																																																					
8		8																																																																					
9		9																																																																					
10		10																																																																					
11		11																																																																					
12		12																																																																					
Espesor total de la solución: 142 [mm] Resistencia térmica total, R_t : 1,749 [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]		Espesor total de la solución: 115 [mm] Resistencia térmica total, R_t : 1,515 [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]																																																																					
<input type="button" value="Limpiar tabla"/>		<input type="button" value="Limpiar tabla"/>																																																																					
Resultados																																																																							
Perfiles de temperatura																																																																							
																																																																							
Perfiles de temperatura																																																																							
																																																																							
Leyenda: Temperatura de rocío, según HR: 65% 75% - - - 80% - - - Temperatura intersticial: ———																																																																							
Verificación de condensación																																																																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">HR interior, ϕ_i:</th> <th colspan="3">Puntos de análisis</th> <th rowspan="2">HR Cond.</th> </tr> <tr> <th>65%</th> <th>75%</th> <th>80%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Condensación superficial:</td> <td>No</td> <td>No</td> <td>No</td> <td>No</td> </tr> <tr> <td>Res. Térmica caso base</td> <td>1,749</td> <td>1,749</td> <td>1,749</td> <td>175%</td> </tr> <tr> <td>Res. Térmica total min, $R_{t,min}$</td> <td>0,325</td> <td>0,482</td> <td>0,619</td> <td>0,325</td> </tr> <tr> <td>Condensación intersticial:</td> <td>Sí</td> <td>Sí</td> <td>Sí</td> <td>Sí</td> </tr> <tr> <td colspan="5">Detalle de interfasas con condensación:</td></tr> <tr> <td>Superficie exterior</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td>Interfase 1</td><td>X</td><td>X</td><td>X</td><td>X</td></tr> <tr> <td>Interfase 2</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td>Interfase 3</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td>Superficie interior</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td>Nº Interfaces condensación:</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr> <td>Total:</td><td colspan="3" rowspan="3">3 Interfases</td><td></td></tr> </tbody> </table>				HR interior, ϕ_i :	Puntos de análisis			HR Cond.	65%	75%	80%	Condensación superficial:	No	No	No	No	Res. Térmica caso base	1,749	1,749	1,749	175%	Res. Térmica total min, $R_{t,min}$	0,325	0,482	0,619	0,325	Condensación intersticial:	Sí	Sí	Sí	Sí	Detalle de interfasas con condensación:					Superficie exterior					Interfase 1	X	X	X	X	Interfase 2					Interfase 3					Superficie interior					Nº Interfaces condensación:	1	1	1	1	Total:	3 Interfases			
HR interior, ϕ_i :	Puntos de análisis				HR Cond.																																																																		
	65%	75%	80%																																																																				
Condensación superficial:	No	No	No	No																																																																			
Res. Térmica caso base	1,749	1,749	1,749	175%																																																																			
Res. Térmica total min, $R_{t,min}$	0,325	0,482	0,619	0,325																																																																			
Condensación intersticial:	Sí	Sí	Sí	Sí																																																																			
Detalle de interfasas con condensación:																																																																							
Superficie exterior																																																																							
Interfase 1	X	X	X	X																																																																			
Interfase 2																																																																							
Interfase 3																																																																							
Superficie interior																																																																							
Nº Interfaces condensación:	1	1	1	1																																																																			
Total:	3 Interfases																																																																						
Verificación de condensación																																																																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">HR interior, ϕ_i:</th> <th colspan="3">Puntos de análisis</th> <th rowspan="2">HR Cond.</th> </tr> <tr> <th>65%</th> <th>75%</th> <th>80%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Condensación superficial:</td> <td>No</td> <td>No</td> <td>No</td> <td>Si</td> </tr> <tr> <td>Res. Térmica caso proyectado</td> <td>1,515</td> <td>1,515</td> <td>1,515</td> <td>152%</td> </tr> <tr> <td>Res. Térmica total min, $R_{t,min}$</td> <td>0,482</td> <td>0,482</td> <td>0,619</td> <td>1,643</td> </tr> <tr> <td>Condensación intersticial:</td> <td>No</td> <td>No</td> <td>No</td> <td>Si</td> </tr> <tr> <td colspan="5">Detalle de interfasas con condensación:</td></tr> <tr> <td>Superficie exterior</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td>Interfase 1</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td>Superficie interior</td><td></td><td></td><td></td><td>X</td></tr> <tr> <td>Nº Interfaces condensación:</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr> <td>Total:</td><td colspan="3">0 Interfases</td><td></td></tr> </tbody> </table>				HR interior, ϕ_i :	Puntos de análisis			HR Cond.	65%	75%	80%	Condensación superficial:	No	No	No	Si	Res. Térmica caso proyectado	1,515	1,515	1,515	152%	Res. Térmica total min, $R_{t,min}$	0,482	0,482	0,619	1,643	Condensación intersticial:	No	No	No	Si	Detalle de interfasas con condensación:					Superficie exterior					Interfase 1					Superficie interior				X	Nº Interfaces condensación:	0	0	0	1	Total:	0 Interfases													
HR interior, ϕ_i :	Puntos de análisis				HR Cond.																																																																		
	65%	75%	80%																																																																				
Condensación superficial:	No	No	No	Si																																																																			
Res. Térmica caso proyectado	1,515	1,515	1,515	152%																																																																			
Res. Térmica total min, $R_{t,min}$	0,482	0,482	0,619	1,643																																																																			
Condensación intersticial:	No	No	No	Si																																																																			
Detalle de interfasas con condensación:																																																																							
Superficie exterior																																																																							
Interfase 1																																																																							
Superficie interior				X																																																																			
Nº Interfaces condensación:	0	0	0	1																																																																			
Total:	0 Interfases																																																																						

Por otra parte, en la sección con lana de vidrio, del resultado presentado en la Tabla 6.9 se obtiene que en la solución con aislante por dentro se generará condensación intersticial en el panel de CLT para una humedad relativa interior igual o mayor 65%, mientras que, para la solución con aislante por el exterior, ocurrirá condensación superficial a partir de un 92%. Es decir, en esta sección, sólo la alternativa con aislante por fuera cumple el requerimiento normativo.

Los resultados obtenidos destacan la importancia de la ubicación del aislamiento. En este ejemplo, al colocar el aislamiento en la cara exterior del panel de CLT, se logran mejores resultados en comparación con su colocación en el interior. Esto se debe a que el aislamiento exterior protege al CLT de las fluctuaciones de temperatura, manteniéndolo siempre a una temperatura por encima de la temperatura de rocío lo que previene el riesgo de condensación intersticial.

Cabe mencionar que, es posible mejorar el caso base con aislación por dentro de modo que cumpla con los requerimientos normativos al agregar una segunda barrera de vapor, como por ejemplo una membrana de polietileno con $Z_p=138$ [MN·s/g], entre el OSB y la cámara de aire no ventilada. De esta forma, se obtienen los gráficos de la Figura 6.5 y la solución condensa superficialmente a partir de un 92% de humedad relativa, similar al caso de aislación por el exterior. No obstante, la incorporación del OSB, de los montantes para la instalación del revestimiento exterior y de la membrana de polietileno suponen un aumento en el costo de

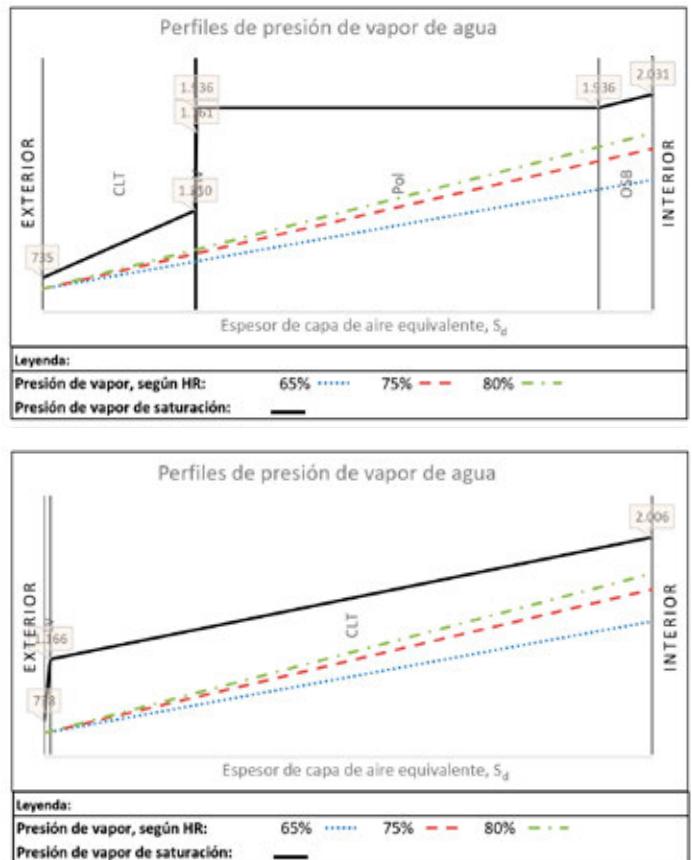


Figura 6.5 - Perfiles de presión de vapor de agua y de temperatura para el caso base con membrana de polietileno.

aproximadamente 0,7 UF/m² de solución⁴⁰, para lograr el mismo nivel de desempeño. Por ende, es preferible tanto técnica como económicamente la solución con aislamiento por el exterior, para las condiciones de diseño dadas. Esta preferencia de ubicación del aislante es en general aplicable a la mayoría de los climas y tanto para estaciones cálidas como para las frías (XLam, 2022).

40. Calculado con la Tabla de precios referenciales para la Región Metropolitana de MINVU (disponible en página web de [DITEC](#)).

REFERENCIAS

CIBSE. (n.d.). *Thermal design, plant sizing and energy consumption: Additional appendices.* <http://www.arup.com>

CIM UC. (2021). *Manual de Soluciones Constructivas.*

CIM UC. (2023). *Estudio y guía de recomendaciones para la hermeticidad al paso del aire.* <https://madera.uc.cl>

Decreto 15 (2024).

DICTUC S. A. (2023). *INFORME DE ENSAYO DE PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA - CLT.* www.dictuc.cl/verifica

Felmer, G., Morales-Vera, R., Astroza, R., González, I., Puettmann, M., & Wishnie, M. (2022). A Lifecycle Assessment of a Low-Energy Mass-Timber Building and Mainstream Concrete Alternative in Central Chile. *Sustainability (Switzerland)*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/su14031249>

FPInnovations. (2019). *Canadian CLT Handbook* (E. Karacabeyli & S. Gagnon, Eds.; Vols. 1, 2). FPInnovations.

MINVU. (2024). *ED12-2024 Listado Oficial de Soluciones Constructivas para Acondicionamiento Térmico del Ministerio de Vivienda y Urbanismo.*

NCh0853-2021 Componentes y Elementos Para Edificación – Resistencia Térmica y Transmitancia Térmica – Métodos de Cálculo (2021).

NCh1079-2019 Arquitectura y Construcción - Zonificación Climática y Térmica Para El Diseño de Edificaciones (2019). www.inn.cl

NCh1973-2014 Comportamiento Higrotérmico de Elementos y Componentes de Construcción - Temperatura Superficial Interior Para Evitar La Humedad Superficial Crítica y La Condensación Intersticial - Métodos de Cálculo (2014). <https://tipbook.iapp.cl/ak/7ba2f4bd8e4ba3715cad4afabda5061914006c38/embed/view/nch1973>

NCh1980-1988 - Acondicionamiento Térmico - Aislación Térmica - Determinación de La Ocurrencia de Condensaciones Intersticiales (1988).

NCh2457-2014 Prestaciones Higrotérmicas de Los Productos y Materiales Para Edificios - Determinación de Las Propiedades de Transmisión de Vapor de Agua (2014). www.inn.cl

NCh3308-2024 Ventilación - Calidad Aceptable de Aire Interior - Requisitos (2024).

NCh3309-Of.2014 Ventilación - Calidad de Aire Interior Aceptable En Edificios Residenciales de Baja Altura - Requisitos (2014). <https://tipbook.iapp.cl/ak/7ba2f4bd8e4ba3715cad4afabda5061914006c38/embed/view/nch3309#page/1>

Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (2024).

Stora Enso. (2022). *CLT by Stora Enso Technical brochure.*

XLam. (2022). *XLam Envelope Design Guide.*



CAPÍTULO 7

DISEÑO DE AISLAMIENTO ACÚSTICO

El diseño acústico consiste en el estudio del comportamiento de una edificación, sus recintos y componentes en lo relativo a sus capacidades para aislar y absorber la transmisión de ruido aéreo, de impacto y por vibraciones. Su objetivo es proporcionar confort acústico y una buena calidad de vida en los espacios interiores.

Este campo se puede dividir en dos grandes ramas: (1) el diseño del **aislamiento acústico**, el cual estudia el comportamiento entre dos recintos diferentes;

y (2) el diseño de la **absorción acústica**, estudiando el comportamiento dentro de un mismo recinto.

Es importante tener en cuenta que la evaluación acústica no se limita únicamente a los materiales de forma individual. El desafío reside en comprender el comportamiento integral del sistema constructivo, donde la interacción entre los materiales, el espacio habitable y el entorno desempeñan un rol clave. Las soluciones que funcionan de manera efectiva en un edificio no necesariamente lo harán en otro, incluso diferentes áreas de un edificio pueden tener requerimientos distintos. Esto implica que, en ciertas condiciones, las edificaciones deban contar con sistemas de aislamiento y/o absorción especializados para minimizar las perturbaciones sonoras provenientes tanto del exterior como de fuentes interiores.

Este capítulo se enfoca en aquellos profesionales que ya tienen conocimientos teóricos básicos del diseño acústico de edificios. En caso de que el usuario quiera revisar en mayor profundidad conceptos preliminares, se recomienda revisar el "[Manual de soluciones constructivas en entramado ligero en madera](#)" (CIM UC, 2021b).

Dicho esto, la sección 7.1 repasa brevemente algunos conceptos generales de la evaluación del comportamiento acústico, centrándose en el diseño del aislamiento acústico, para luego exponer el desempeño inherente del CLT. Posteriormente, la sección 7.2 presenta los requerimientos normativos nacionales⁴¹ para el diseño de aislamiento acústico de edificios.

Los conceptos y principios presentados pretenden abarcar recomendaciones y en ningún caso son exhaustivos o normativos, a no ser que se explique lo contrario. El diseño de cada solución para un proyecto en particular es responsabilidad del proyecto, quien debe ejercer su criterio justificado, pudiendo apoyarse en las recomendaciones teóricas expuestas en el presente capítulo.

41. Este capítulo se redactó utilizando la normativa chilena vigente a la fecha de publicación de esta guía. Para referencias con fecha, sólo se aplica la edición citada. Para referencias sin fecha se aplica la última edición del documento referenciado.

7.1 EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ACÚSTICO EN EDIFICIOS Y PARTICULARIDADES DEL CLT

7.1.1 Conceptos generales

Previo a revisar el desempeño acústico inherente del CLT y cómo mejorarlo, es necesario tener en claro y repasar ciertos conceptos generales del diseño acústico.

7.1.1.1 Sonido y ruido

El **sonido** es una onda mecánica que se genera por la vibración de un medio, como el aire, los líquidos o los sólidos. Estas vibraciones crean fluctuaciones de presión que se propagan a través del medio en forma de ondas.

Cuando un sonido es identificado como molesto, indeseado o perturbador, se denomina **ruido**. Es decir, por definición, el ruido es un concepto subjetivo. Su valoración depende tanto de las características físicas del sonido, como del uso específico del espacio en el que se ubica el receptor y la percepción individual que tiene del ruido.

7.1.1.2 Tipos de ruido: ruido aéreo y ruido de impacto

En el diseño acústico se reconocen tres tipos de ruidos: el ruido aéreo, el ruido de impacto y el ruido inducido por vibración. Los primeros dos están sujetos a requisitos en la OGUC, por lo que este capítulo se centra en ellos, sin pro-

fundizar en el ruido inducido por vibraciones de maquinaria.

El **ruido aéreo** es aquel que se propaga por el aire. Se origina cuando una fuente sonora, como una conversación o música, mueve el aire, generando ondas de presión. Estas ondas se propagan por el espacio en todas direcciones y al incidir sobre las estructuras de la edificación, hacen que estas vibren y propaguen el ruido a través de estas hacia otras partes de la edificación.

En cambio, el **ruido de impacto** se transmite en forma de vibraciones por los cuerpos sólidos o estructuras, debido a golpes, pisadas, movimiento de muebles, entre otros. Este tipo de ruido se propaga rápidamente a través de toda la estructura con muy pocas perdidas de energía, pudiendo incluso afectar todo el edificio.

7.1.1.3 Aislamiento acústico y Absorción acústica

Para controlar y mitigar los distintos tipos de ruido en una edificación, se estudian el aislamiento acústico y la absorción acústica, las dos grandes ramas del diseño acústico.

El **aislamiento acústico** estudia la transmisión de ruido aéreo y ruido de impacto entre dos recintos diferentes⁴². Este no sólo depende de las propiedades de los elementos constructivos (ver 7.1.1.6), sino que también está influenciado por la configuración de las uniones (ver Figura 7.1) y la calidad de la construcción.

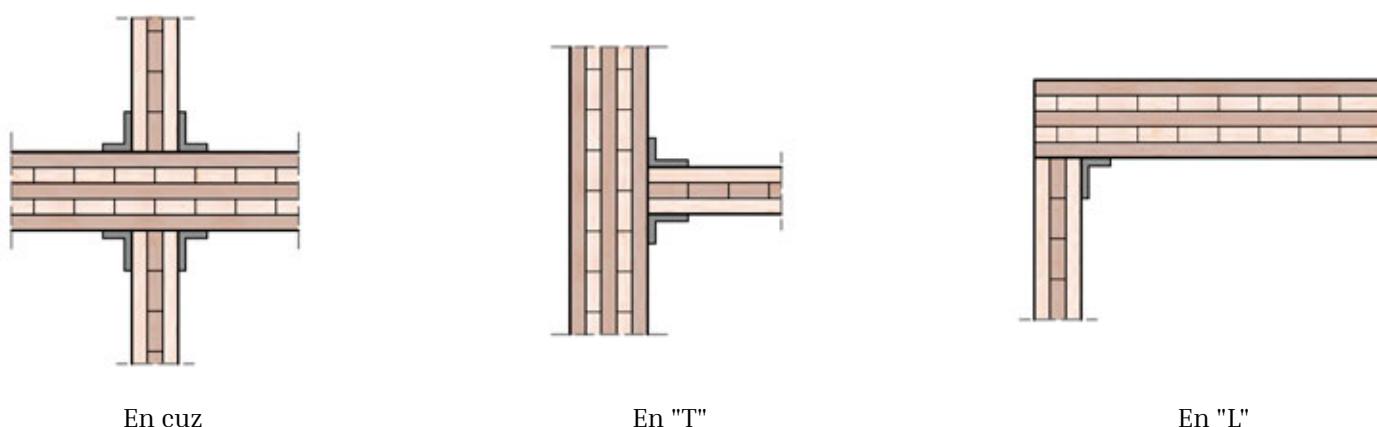


Figura 7.1 - Configuración de uniones.

42. En ocasiones el concepto aislamiento acústico también puede referirse a la propiedad de un material o componente. En esta guía se diferencia este concepto como aislación acústica (ver 7.1.1.6).

Por otro lado, la **absorción acústica** estudia el comportamiento dentro de un mismo recinto en relación con la energía acústica incidente y la energía reflejada sobre una superficie. Se analizan dos principales propiedades. La primera, conocida también como absorción acústica, es la capacidad de los materiales para reducir el nivel de ruido al convertir parte de la energía sonora en calor. Esta propiedad es medida a través del **coeficiente de absorción acústica (α)**, que indica el porcentaje de ruido absorbido por el material. La segunda propiedad, es el **tiempo de reverberación**, que corresponde al tiempo que tarda el sonido en decaer desde un nivel inicial hasta aproximadamente la millonésima parte.

Aunque el diseño de la absorción acústica es relevante para un buen confort acústico, no constituye un requisito obligatorio según la OGUC, razón por la cual no se profundiza en esta guía. Dicho esto, los siguientes conceptos y secciones tratan particularmente del diseño del aislamiento acústico.

7.1.4 Escenarios de transmisión del ruido (relación interior/exterior)

Tal como se mencionó en la sección 7.1.3, el diseño de aislamiento acústico implica dos recintos, los cuales puede ser interiores o exteriores, dando origen a tres posibles escenarios de transmisión del ruido, ilustrados en la Figura 7.2. Identificar y analizar de manera independiente estos distintos escenarios permite determinar las estrategias más adecuadas para cada uno.

7.1.5 Vías de transmisión: transmisión directa o indirecta y transmisión aérea o estructural

Una vez identificados los escenarios de transmisión, se deben reconocer las vías de transmisión del ruido en edificaciones. Existen dos clasificaciones: la primera, en base al recorrido de las ondas, que puede ser vías directas o indirectas; y la segunda en base el medio en que se transmiten, que puede ser vías aéreas o estructurales.

La **transmisión directa (D)** ocurre cuando el ruido atraviesa los elementos divisorios entre los recintos, sin rodeos. En cambio, la **transmisión indirecta (F)** ocurre cuando el ruido se propaga mediante todas

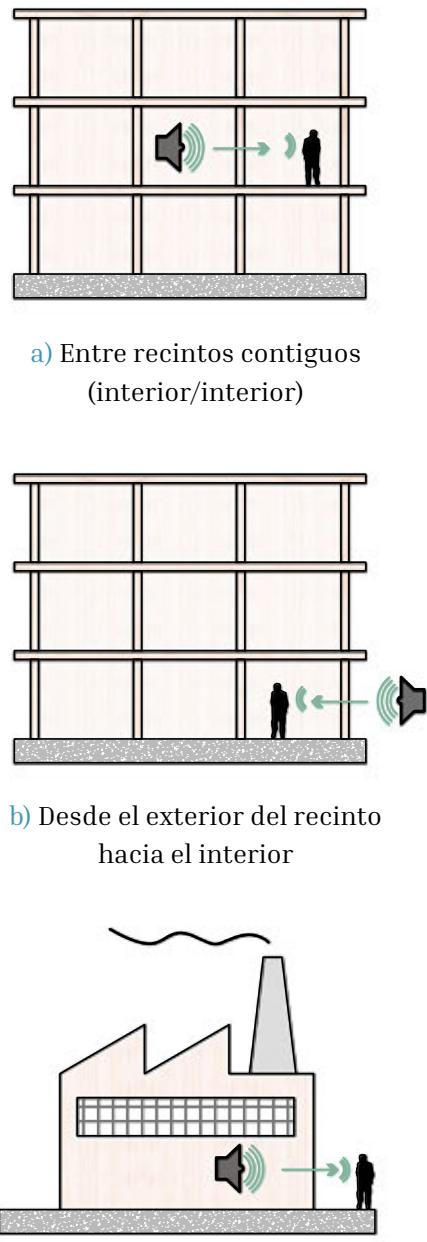


Figura 7.2 - Escenarios de aislamiento de ruido

la superficies o estructuras adyacentes, también conocida como transmisión por flancos.

En cuanto a la clasificación en base al medio, la **transmisión aérea**, ocurre por medio del aire en aquellos huecos de la edificación en donde no existe una barrera sólida o estanca entre los espacios (por ejemplo: en holgura de puertas, ventanas mal selladas, cajas eléctricas, entre otros). En cambio,

en la **transmisión estructural**, el medio son los elementos sólidos como muros, pisos techos o las uniones entre ellos.

Estas distintas clasificaciones se pueden combinar, dando origen a múltiples vías de transmisión, como se ilustra en la Figura 7.3. Comúnmente, en la nomen-

clatura de las combinaciones de vías estructurales se utilizan letras mayúsculas para el recinto emisor (D o F) y minúsculas para el recinto receptor (d o f). Cabe mencionar que la transmisión aérea directa es poco probable de ocurrir, ya que normalmente no existen aberturas entre elementos divisorios (muros divisorios y entrepisos acústicos).

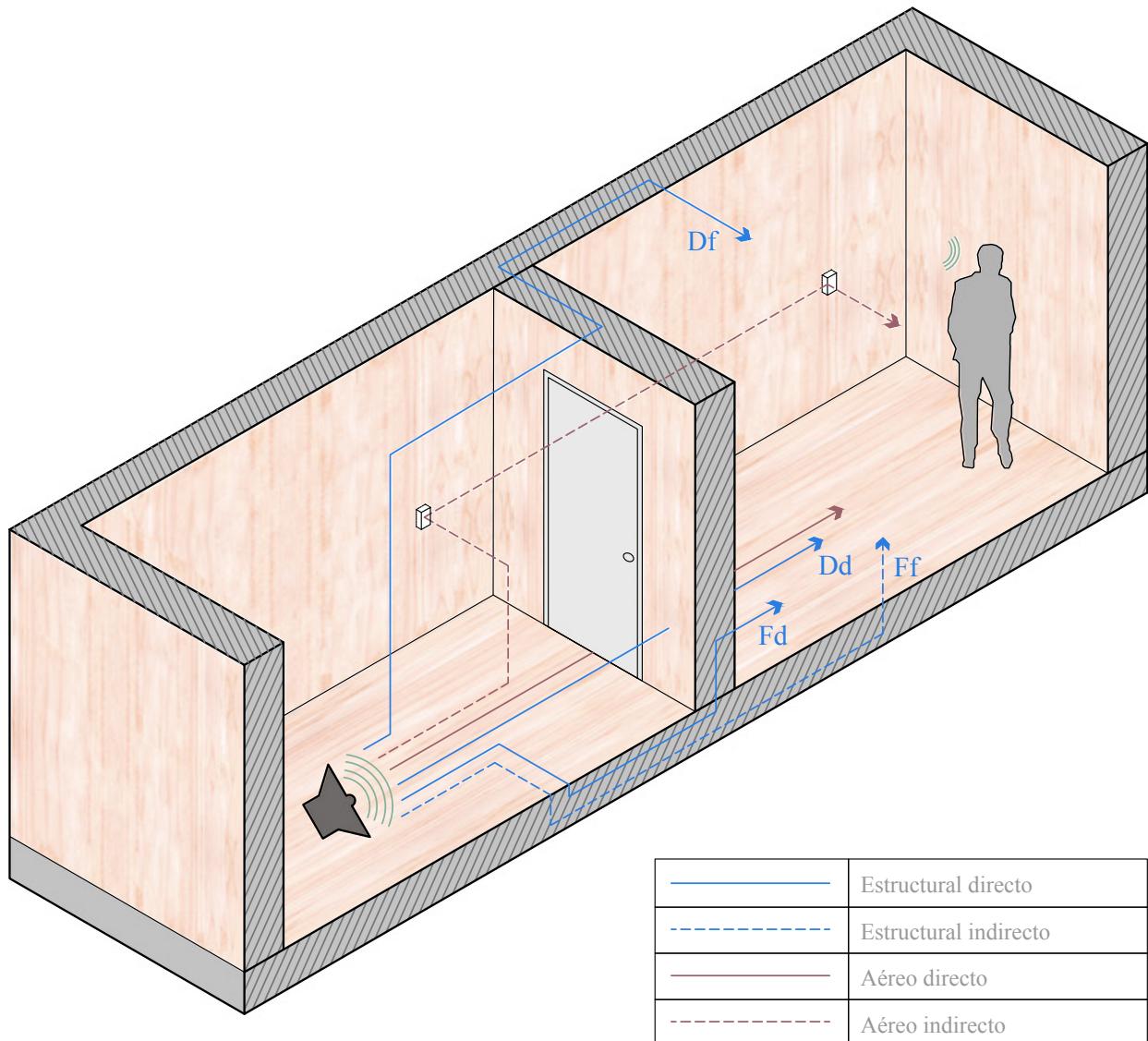


Figura 7.3 - Trasmisión de ruido en los edificios

7.1.1.6 Indicadores de la aislación acústica: índice de reducción acústica R y nivel de presión acústica de impacto L'

Para controlar el ruido por transmisión estructural, se mide (o estima) la **aislación acústica**, propiedad que se refiere a la capacidad intrínseca de un material, elemento o recinto para reducir la transmisión del ruido entre espacios, dependiendo de sus propiedades físicas. Dado que los materiales presentan diferente desempeño frente al ruido aéreo y al ruido de impacto, la aislación acústica se mide con dos indicadores cuantitativos.

Por un lado, el **índice de reducción acústica (R_w)**, representa la diferencia de niveles sonoros entre el recinto de emisión y de recepción, midiendo la capacidad de un material o elemento para reducir la transmisión del ruido aéreo que incide sobre él. Mientras más alto es este valor, mejor es la aislación acústica.

Por otro lado, el **nivel de presión acústica de impacto (L_n)**, mide el nivel de presión acústica generada por ruido de impacto. Mientras más bajo es este valor, mejor es la aislación acústica.

7.1.1.7 Métodos de evaluación del desempeño: ensayo en laboratorio o en terreno.

El desempeño acústico de un material o solución constructiva nunca va a ser igual en laboratorio y en terreno, debido a las diferentes condiciones del recinto en el cual se mide.

En el caso de **ensayos en laboratorio**, los recintos de ensayo están construidos de manera tal que las vías de transmisión estructurales indirectas están lo suficientemente suprimidas como para obtener un resultado únicamente la aislación acústica a través de la vía directa, caracterizando así solo la solución constructiva bajo ensayo.

En el caso de **ensayos en terreno**, en cambio, al habitualmente no existir tal supresión de las vías de transmisión estructurales indirectas y a la habitual existencia de vías de transmisión aé-

rea directa e indirecta, el resultado obtenido allí es una medida de la aislación entre los recintos ensayados en su contexto y no únicamente a la solución constructiva divisoria. Debido a esto, la aislación acústica medida en terreno es numéricamente peor o igual a la obtenida en laboratorio. Para distinguir ambos ensayos, a la aislación acústica en terreno se le agrega la distinción de “aparente”, y el símbolo incluye un apóstrofe, es decir R'_w y L'_n .

7.1.2 Desempeño acústico inherente del CLT

7.1.2.1 El CLT como pared simple

Uno de los métodos utilizados para evaluar el desempeño acústico de forma teórica de cualquier material es mediante la aplicación de la ley de masa, un principio que establece que la capacidad de un material para bloquear el ruido depende principalmente de su masa por metro cuadrado. Esta forma de medir el índice de reducción acústica (R_w), se utiliza para elementos clasificados como de **pared simple** o “acústicamente de una capa”. En otras palabras, materiales homogéneos o de una única capa continua, sin elementos complementarios ni cámaras de aire. Debido a ello, su desempeño acústico está determinado únicamente por sus propiedades inherentes, como la densidad y el espesor.

Este hecho posiciona al hormigón armado como un material con buena aislación acústica por sí solo⁴³ y ha instaurado una de las premisas más conocidas y básicas para mejorar el desempeño acústico en edificaciones: a mayor masa mejor aislación acústica.

Debido a su composición un panel de CLT se asume un elemento de pared simple. No es extraño entonces pensar en primera instancia que la masividad del CLT le entregaría un buen desempeño acústico. Sin embargo, debido a la baja densidad de la madera, los paneles de CLT por sí solos no logran ser lo suficientemente masivos para tener una gran aislación acústica.

43. A modo de referencia, la solución constructiva D.M.H.01.01 del Listado Oficial de Soluciones Constructivas para Acondicionamiento Acústico (MINVU, 2024b) correspondiente a un muro de hormigón armado de 110 [mm] de espesor, tiene un índice de reducción acústica de 48 [dB]

La fórmula general de la ley de masas de Berger es quizás la ecuación más utilizada para estimar la aislación acústica de paredes simples. Sin embargo, se ha demostrado experimentalmente que entrega valores que suelen sobreestimar el desempeño real del CLT⁴⁴. Esto ha llevado al desarrollo de distintas

fórmulas empíricas para paneles de CLT, como las propuestas por Di Bella & Mitrovic (2020), indicadas en las ecuaciones (7.1) y (7.2) para el ruido aéreo y el de impacto respectivamente. Estas fórmulas son válidas para paneles de CLT con una masa por unidad de área entre 35 y 130 [kg/m²].

$$(7.1) \quad R_w = 20,3 \log(m')$$

$$(7.2) \quad L_n = 128 - 22 \log(m')$$

en que:

R_w = índice de reducción acústica, en [dB]

L_n = nivel de presión sonora de impacto normalizado, en [dB]

m' = masa por unidad de área del elemento, en [kg/m²]

En ocasiones el concepto aislamiento acústico también puede referirse a la propiedad de un material o componente. En esta guía se diferencia este concepto como aislación acústica (ver 7.1.1.6).

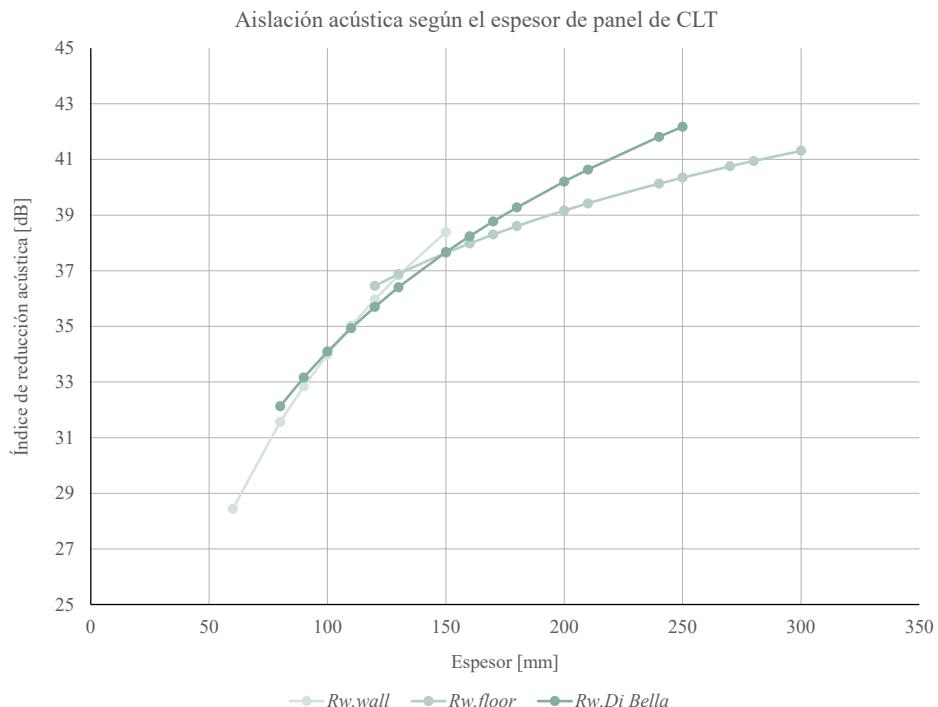


Figura 7.4 - Aislación acústica según el espesor de panel de CLT

La Tabla 7.1 presenta los valores del índice de reducción acústica y del nivel de presión sonora para distintos espesores de paneles de CLT. Estas fórmulas proporcionan una estimación básica del aislamiento acústico de paneles de CLT como pared simple que, según el requerimiento acústico de la solución constructiva, puede ser suficiente o no. Particularmente para muros divisorios espesores razonables de CLT no alcanzan la aislación necesaria por sí solos.

44. La ley de masas de Berger no solo sobreestima el índice de reducción acústica del CLT. Esta sobreestimación también ocurre con el hormigón armado. Cabe mencionar que existen otros modelos teóricos para estimar el R_w que consideran otras propiedades de los materiales, como la rigidez, coeficiente de Poisson, frecuencia crítica, entre otras.

TABLA 7.1 – Propiedades de aislación acústica para distintos espesores de CLT
(elaboración propia)

Espesor t_{ext} [mm]	Masa por superficie m' [kg/m ²]	Índice de reducción acústica			Nivel de presión sonora de impacto L_n [dB]
		R_w ¹⁾ [dB]	$R_{w,wall}$ ²⁾ [dB]	$R_{w,floor}$ ³⁾ [dB]	
80	38	32	32	-	93
90	43	33	33	-	92
100	48	34	34	-	91
110	53	35	35	-	90
120	57	36	36	36	89
130	62	36	37	37	89
150	72	38	38	38	87
160	76	38	-	38	87
170	81	39	-	38	86
180	86	39	-	39	85
200	96	40	-	39	84
210	100	41	-	39	84
240	115	42	-	40	83
250	120	42	-	40	82

NOTA 1 Calculado según ecuación (7.1).

NOTA 2 Calculado como $R_{w,muro}=25\log(m')-8$ [dB]. Aplicable para muros de CLT entre 60 y 150 [mm], según Stora Enso (2020).

NOTA 3 Calculado como $R_{w,losa}=25\log(m')+15$ [dB]. Aplicable para losas entre 120 y 320 [mm], según Stora Enso (2020).

NOTA 4 Calculado según ecuación (7.2).

NOTA 5 Todos los valores están calculados para la densidad normal del pino radiata de 478 [kg/m³].

Estimar el desempeño acústico de un elemento según su masa permite comparar fácilmente el CLT con el hormigón armado. No así con el otro sistema constructivo en madera más utilizado: el entramado ligero. Naturalmente, el entramado ligero no se comporta como un elemento de pared simple, dado que la zona de los pies derechos,

aislante térmico y cámara de aire, no componen una capa homogénea. Debido a ello, el entramado ligero presenta un comportamiento de **pared doble**, en que el espaciamiento entre las placas de cada cara, el aislante térmico y las cámaras de aire le entregan un desempeño acústico superior al CLT con menores espesores, masa y costos⁴⁵.

45. A modo de referencia la solución constructiva D.M.M.01.03 del Listado Oficial de SCAA (MINVU, 2024b) corresponde a un muro de entramado ligero de 163 [mm] de espesor, tiene un índice de reducción acústica aparente de 50 [dB].

7.1.2.2 Transmisión de vibraciones a través de las uniones del CLT

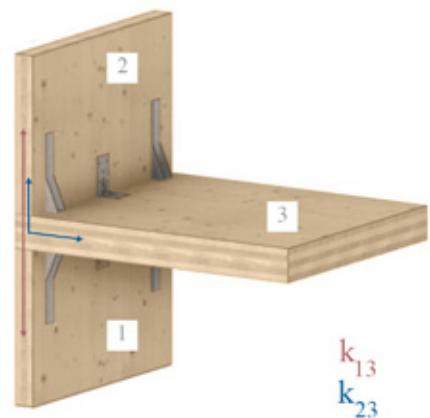
Otra de las particularidades acústicas del sistema constructivo con CLT son sus uniones. Al ser constructivamente un sistema discreto, el CLT requiere de uniones, comúnmente metálicas, para generar una trayectoria de carga continua entre elementos estructurales. Acústicamente, estas uniones representan **puntos de flanqueo** como vías de transmisión estructural, que se suelen estimar mediante el parámetro K_{ij} (ver sección 0).

El *Flanksound Project* demostró mediante campañas experimentales que las uniones, particularmente las materializadas con conectores discretos (anclajes de vuelco y de corte), presentan una transmisión de vibraciones acústicas más crítica que la transmisión mediante los mismos paneles de CLT (Morandi et al., 2018). Estos conectores discretos se suelen utilizar en las uniones en forma de cruz y en forma de T, como las presentadas en la Figura 7.5. Al ser uno de los puntos críticos en la transmisión de ruido, su análisis es particularmente relevante en el diseño acústico de edificaciones en CLT.

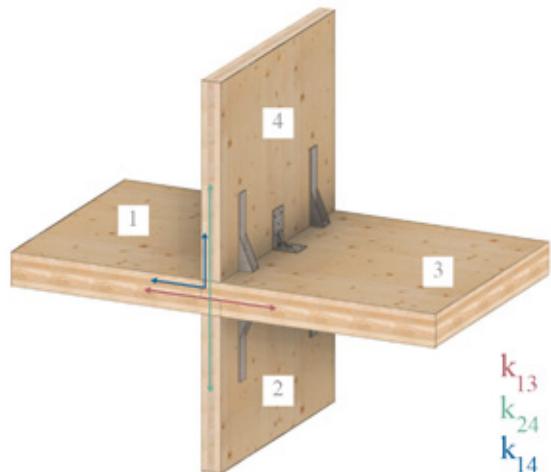
7.1.3 ¿Cómo mejorar el rendimiento acústico de un proyecto o un componente de CLT?

Luego de haber repasado los conceptos acústicos generales y las características del desempeño inherente del CLT, reconociendo que hay distintas oportunidades de mejora, esta sección aborda las estrategias utilizadas para mejorar el rendimiento acústico tanto a nivel de proyecto como de solución constructiva.

Es importante enfatizar que para lograr un aislamiento acústico efectivo es necesario aplicar las estrategias lo más cerca posible de la fuente emisora del ruido, evitando que las ondas sonoras se propaguen hacia otras áreas de la edificación. Esto se debe a que las vibraciones del ruido, al atravesar diferentes materiales, pueden cambiar su frecuencia debido a las propiedades naturales de estos. Este fenómeno puede reducir la efectividad de los



a) UMLM en forma de T



b) UMLLM en forma de cruz

Figura 7.5 - Uniones entre paneles de CLT con conectores discretos.

productos fonoaislantes, afectando el conjunto de estrategias elegidas. Por lo tanto, es importante identificar el tipo de ruido y determinar la solución más adecuada para reducirlo de manera efectiva.

Las estrategias descritas en la Tabla 7.2 presentan distintas formas de abordar distintos tipos de ruido, considerando los escenarios y vías por donde se transmiten. Estas estrategias no son excluyentes entre sí, sino que se recomienda aplicar de manera complementaria, combinando sus beneficios para una mayor efectividad.

TABLA 7.2 – Estrategias generales para mejorar el rendimiento acústico.

Estrategia	Descripción
i. Aumentar la masa	Incrementar la masa en elementos constructivos mejora la capacidad de aislar el ruido aéreo, ya que materiales con más masa tienden a atenuar la propagación del ruido.
ii. Desacoplamiento estructural	Desacoplar capas o elementos estructurales bloqueando la transferencia del ruido mediante el aislamiento de los puntos de contacto.
iii. Aumentar la cámara de aire	El uso de cámaras de aire entre elementos constructivos mejora el aislamiento acústico, especialmente en elementos entre unidades.
iv. Evitar puentes acústicos	Detalles constructivos que previenen la formación de puentes acústicos, ya que estos facilitan la transmisión del ruido a través de la estructura.
v. Amortiguación	Materiales que disipan la energía cinética de las ondas sonoras, convirtiéndola en calor, como membranas acústicas o revestimientos con propiedades amortiguadoras, mejoran el aislamiento acústico.
vi. Correcta elección de revestimientos	Materiales como paneles de madera perforada, moquetas o materiales fonoabsorbentes pueden mejorar la absorción del ruido.
vii. <i>Layout</i> (Distribución de espacios)	Una adecuada distribución de espacios entre habitaciones y cavidades de servicio puede reducir la transmisión del ruido.
viii. Distancia entre ventanas	Colocar ventanas en ubicaciones opuestas o con suficiente distancia entre ellas ayuda a reducir la transmisión de ruido exterior.

NOTA Se destacan las estrategias más atingentes al CLT.

7.1.3.1 Aumentar la masa

Tal como se mencionó en la sección 7.1.2.1, una de las premisas básicas más conocidas para mejorar el desempeño acústico en edificaciones es incrementar la masa de los elementos constructivos. En el caso del CLT, existen limitaciones prácticas que deben considerarse. Por ejemplo, como se observa en los valores de la Tabla 7.1, al duplicar el espesor del panel se consigue apenas un incremento de 6 [dB] en la reducción acústica aérea.

En el contexto de un muro divisorio en una edificación habitacional, el cual tiene requisitos normativos específicos (ver sección 7.2.1), un panel de CLT requeriría un espesor cercano a 360 [mm] para cumplir las exigencias por sí solo (sin considerar un posible factor de seguridad C o C_{tr} por el uso). Tal espesor de muro repercute directamente en el diseño arquitectónico, cálculo estructural, costos económicos, entre otros; por lo que no siempre es una alternativa factible.

Otra alternativa del aumento de masa es la aplicación de una capa adicional de mayor densidad, por ejemplo, una sobrelosa de hormigón. De todas formas, se recomienda que el diseño se enfoque en el uso complementario de las estrategias descritas en este capítulo.

7.1.3.2 Desacoplamiento estructural y aumento de cámara de aire:

Otra de estas estrategias es el desacoplamiento estructural, es decir, separar físicamente las capas sólidas de la solución constructiva, limitando así la propagación de la onda acústica por medios rígidos. Esta técnica puede implementarse en una solución constructiva al generar un espacio entre el panel de CLT y otro componente sólido, pudiendo ser o no otro panel de CLT.

El espacio generado puede mantenerse como una cámara de aire o bien integrar aislantes térmicos y/o productos fonoaislantes. También existe la

posibilidad de utilizar productos anti-vibratorios diseñados específicamente para generar la separación del elemento estructural (panel de CLT) y la otra superficie, como se ilustra en la Figura 7.6.

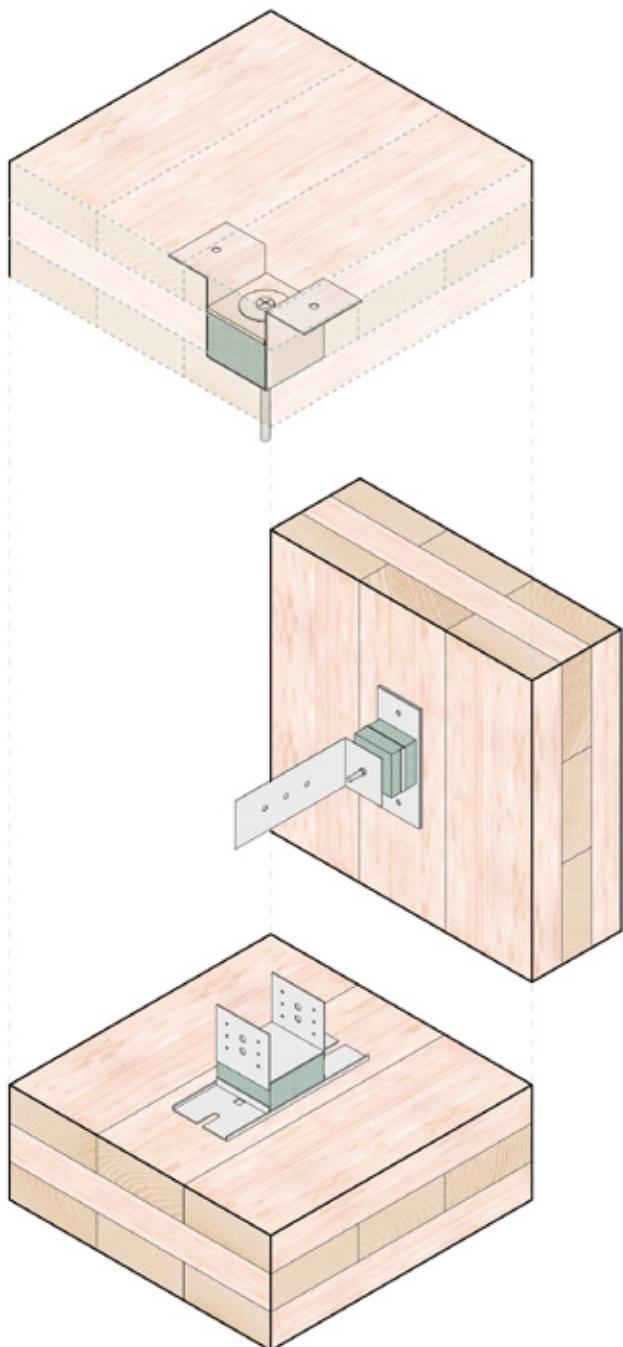


Figura 7.6 - *Productos para desacoplamiento anti-vibratorios (conectores resilientes)*

Este desacoplamiento se puede materializar de diferentes formas según si el elemento estructural es vertical (como muros divisorios) u horizontal (como entrepisos acústicos).

i. Elementos verticales

En el caso de elementos verticales, como por ejemplo muros divisorios entre unidades colindantes, una solución eficiente es el sistema de pared doble, donde los paneles de CLT de cada unidad se colocan de manera independiente sin contacto directo entre ellos. Esta estrategia ofrece un rendimiento significativamente superior en comparación con un muro de pared simple con la misma masa, como se presenta en la Tabla 7.3.

ii. Elementos horizontales

En el caso de elementos horizontales, como entrepisos, el desacoplamiento estructural se puede lograr mediante la implementación de cielos falsos y/o pisos flotantes. El cielo falso mejora el aislamiento acústico aéreo al evitar el contacto directo con el panel de CLT. Esto se logra mediante la generación de una cámara de aire y/o con el uso de materiales complementarios, que en conjunto aumentan la capacidad de la losa para bloquear el ruido.

Por otra parte, el **piso flotante** es un tipo de recubrimiento que consiste en una capa sólida y rígida instalada sobre una capa blanda o un conector resiliente, que a su vez está sobre el elemento estructural. Este sistema crea una amortiguación efectiva al separar el piso terminado del panel de CLT, mediante materiales flexibles, lo que reduce significativamente la trasmisión de ruido de impacto. La Figura 7.7 presenta distintos tipos de piso flotante.

Dado que en los entrepisos acústicos se debe aislar el ruido de impacto, en la mayoría de los casos es más eficiente la estrategia de un piso flotante, ya que, como se mencionó al inicio de la sección 7.1.3, la estrategia de aislación se encuentra más cerca de la fuente emisora. De esta forma, se reduce también la transmisión estructural indirecta por los muros inferiores.

TABLA 7.3 - Desacoplamiento de elementos verticales como muros divisorios.

	Pared simple	Pared doble	
	m'_1	$m'_1 + m'_2$	$m'_1 + d + m'_2$
Esquema			
$R_w =$	$20,3 \log(m'_1)$	$20,3 \log(m'_1 + m'_2)$	$20,3 \log(m'_1) + 6 + 20,3 \log(m'_2)$
<i>Ejemplo: m'_1 y m'_2 paneles de CLT de 100 [mm]; $d=100$ [mm]</i>			
$m' =$	$48 \text{ [kg/m}^2]$	$96 \text{ [kg/m}^2]$	$96 \text{ [kg/m}^2]$
Espesor total	100 [mm]	200 [mm]	300 [mm]
$R_w =$	$20,3 \log(48)$ 34 [dB]	$20,3 \log(48+48)$ 40 [dB]	$20,3 \log(48)+6+20,3 \log(48)$ 74 [dB]

NOTA Para la cámara de aire en pared doble se considera un aporte de + 6 [dB] (Stora Enso, 2020)

Vale mencionar, que en los entrepisos de CLT se deben tener también en cuenta ciertos requerimientos arquitectónicos, ya que tanto los habitantes como los diseñadores a menudo desean mantener los cielos expuestos como parte de la estética del espacio. En estos casos, se recomienda que la estrategia de desacoplamiento vaya por la implementación de un piso flotante, sin interferir en la apariencia inferior del panel. No obstante, si los requerimientos de protección contra el fuego son más estrictos, puede ser necesario la incorporación de un cielo falso.

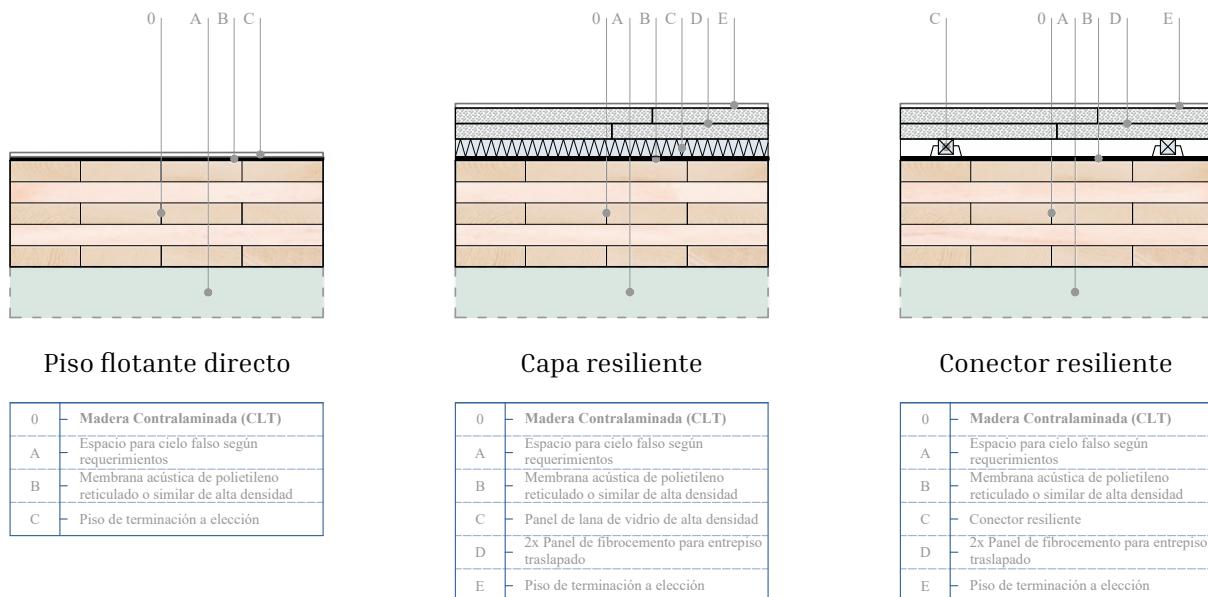
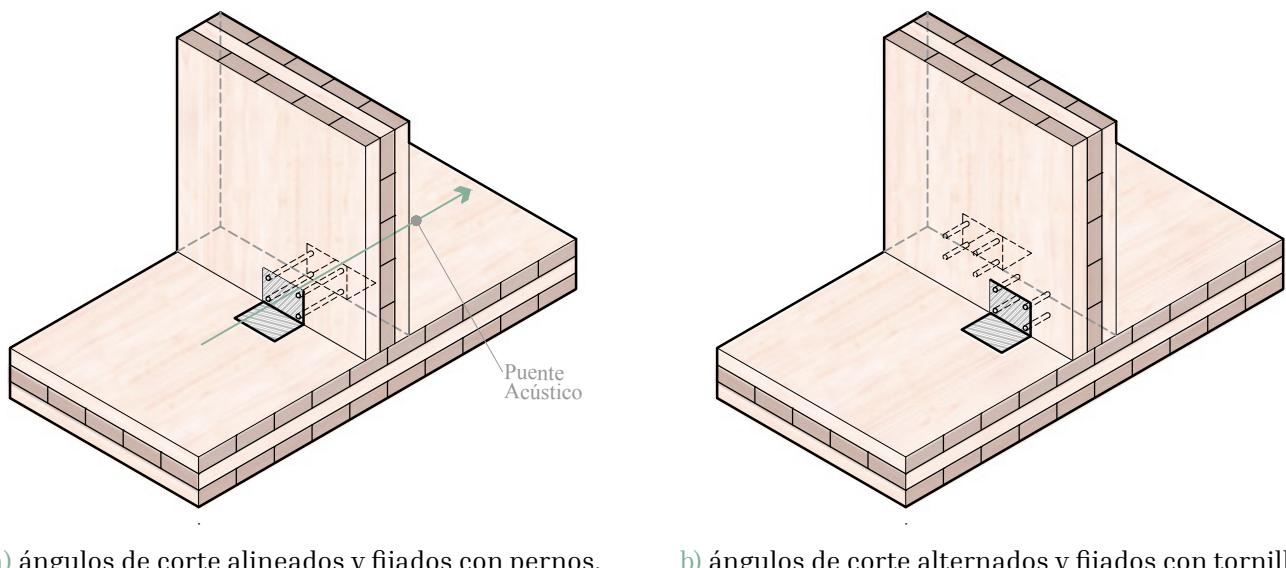


Figura 7.7 - Tipos de piso flotante sobre losas de CLT

7.1.3.3 Evitar puentes acústicos (puntos de flanqueo)

Los puentes acústicos se forman cuando los elementos sólidos están conectados mediante uniones rígidas atravesando todo el espesor de la solución constructiva (transmisión estructural) o cuando existen perforaciones o espacios que conectan el recinto emisor y el receptor (transmisión aérea).

Tal como se comentó en la sección 7.1.2.2, la transmisión estructural por medio de las uniones es particularmente relevante en edificaciones de CLT, ya que, comúnmente, los distintos paneles se unen con conectores metálicos más rígidos que la madera y que naturalmente tienen una alta capacidad para transmitir el ruido. Para evitar estos puentes acústicos se recomienda priorizar disposiciones alternadas y/o el uso de productos fonoaislantes (ver 7.1.3.4).



a) ángulos de corte alineados y fijados con pernos.

b) ángulos de corte alternados y fijados con tornillos.

Figura 7.8 - Ejemplo de puente acústico por conectores metálicos uniendo paneles de CLT.

Otros posibles puentes acústicos por transmisión estructural en edificaciones de CLT ocurren con los rastreles o montantes para instalar capas sólidas no estructurales, como fachadas, cielos falsos, pisos flotantes, entre otros. Fenómeno similar a lo que ocurre con los pies derechos en el entramado ligero. Al igual que para las uniones, entre las posibles soluciones están una disposición alternada o el uso de productos fonoaislantes y/o anti-vibratorios.

Por otra parte, los puentes acústicos por transmisión aérea, debido a perforaciones o huecos que conectan los dos recintos, ocurren comúnmente a través de las cajas eléctricas. Dicho esto, se sugiere evitarlas en muros divisorios o, en su defecto, cuando los muros divisorios incorporen cajas eléctricas, que

están pertenezcan a líneas distintas y no estén conectadas entre sí.

Identificar y abordar los puntos de flanqueo desde etapas tempranas del diseño es muy relevante para contrarrestar la transmisión del ruido y mitigar sus efectos negativos. Por esta razón, es recomendable un diseño interdisciplinario de las uniones y considerar el uso de productos acústicos complementarios que proporcionen amortiguación acústica.

7.1.3.4 Amortiguación: productos fonoaislantes.

Para edificaciones de CLT, se utilizan distintos elementos y materiales que permiten el desacoplamiento estructural y evitar puentes acústicos, mediante el principio de amortiguación de energía.

Estos elementos se denominan **productos fonoaislantes**, que funcionan absorbiendo y disipando las vibraciones sonoras en forma de calor, mejorando el aislamiento frente a los distintos tipos de ruido y minimizando la transferencia por vías estructurales.

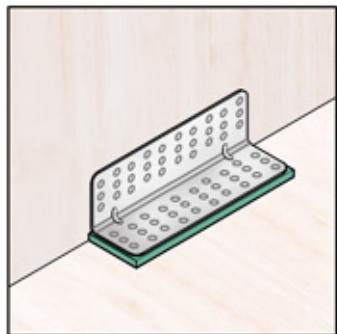
Para la elección de un producto fonoaislante adecuado, es necesario tener en cuenta dos principales condiciones generales: (1) el uso específico de los recintos en que se está diseñando el aislamiento acústico; (2) el tipo de ruido que se requiere reducir, si es ruido aéreo, de impacto o de vibraciones, ya que cada uno se transmite en distintas frecuencias.

En conocimiento de las condiciones generales de diseño, se recomienda informarse y asesorarse sobre las características de los productos disponibles, ya que estos suelen estar diseñados para reducir frecuencias específicas, por ende, para distintos usos y distintos tipos de ruido. Un producto diseñado para el control de ruido impacto no necesariamente se desempeñará bien frente al ruido aéreo. Por otra parte, es recomendable valorar más el desempeño acústico declarado en las fichas técnicas del fabricante que las características físicas del producto, como el espesor o la densidad. Otro factor relevante que considerar es la degradación del producto y su vida útil, es decir, su rendimiento en el tiempo.

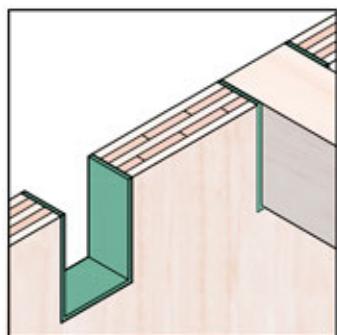
Entre los productos fonoaislantes comúnmente utilizados en la industria, se pueden encontrar principalmente dos familias:

i. Bandas acústicas (soluciones para uniones)

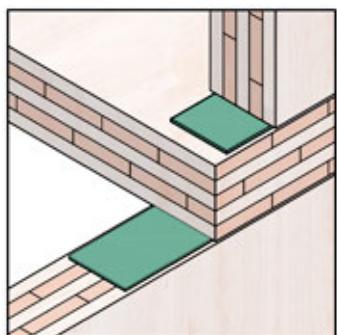
Las bandas acústicas son elementos que se colocan entre los paneles de CLT y otros elementos constructivos. Estas bandas interrumpen la transmisión estructural, mejorando el aislamiento frente a ruido de aire⁴⁶ y su transferencia a través de uniones metálicas. La elección de las bandas acústicas, generalmente se realiza en función de la compresión a la que estarán sometidas. Se recomienda siempre consultar con el fabricante.



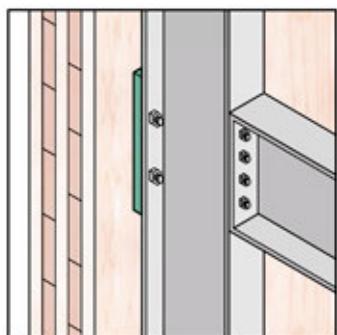
Unión con herraje metálico



Unión muro – viga



Unión muro – losa – muro



Unión otros materiales

Figura 7.9 - Aplicación bandas Acústicas

46. Algunas bandas acústicas pueden estar diseñadas también para reducir ruidos de impacto o vibraciones, se recomienda consultar con el fabricante.

ii. Láminas Fonoaislantes

Las láminas fonoaislantes son productos delgados y flexibles diseñados específicamente para reducir la transmisión de ruido entre diferentes recintos o elementos constructivos. Estos productos, a diferencia de las bandas acústicas, se comercializan en formatos más grandes, ya que están destinadas a cubrir elementos completos. Están elaborados principalmente a partir de materiales como el polietileno (PE), bituminosas, mallas tridimensionales, caucho y textiles reciclados, membranas de corcho, entre otros.

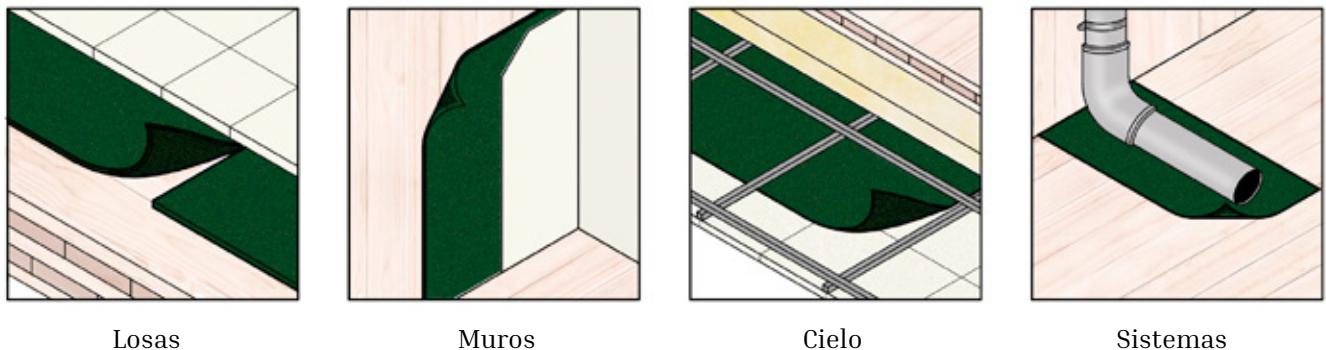


Figura 7.10 - Aplicación de láminas fonoaislantes

La Figura 7.11 ilustra un ejemplo de la aplicación combinada de distintas estrategias para mejorar el rendimiento acústico frente a las vías de transmisión estructural en una unión en forma de T.

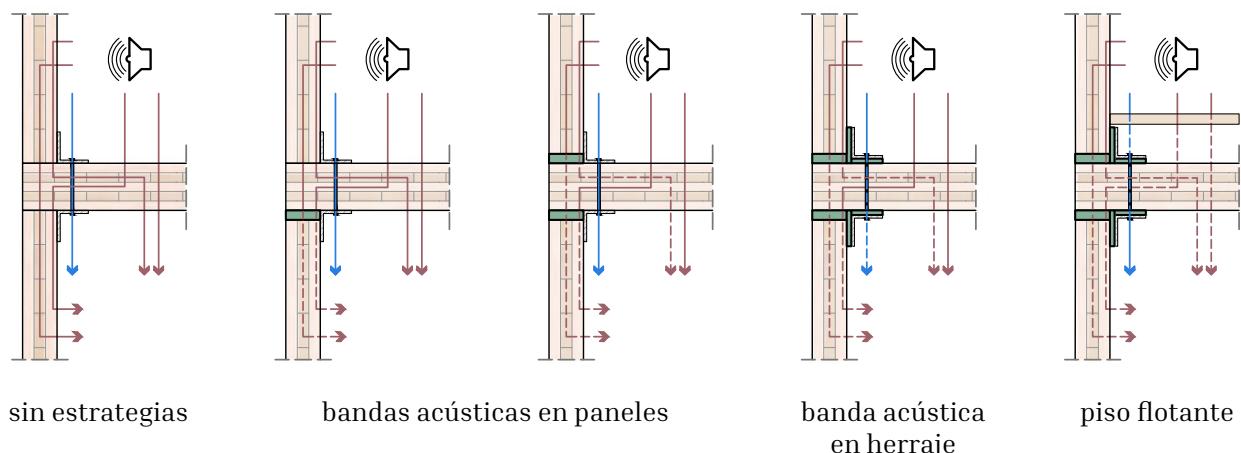


Figura 7.11 - Ejemplo de aplicación de estrategias de aislación acústica

7.2 REQUERIMIENTOS NORMATIVOS

7.2.1 Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones

Los requerimientos normativos asociados al diseño de aislamiento acústico, establecidos en la OGUC, se presentan en los artículos 4.1.5 y 4.1.6.

El primer artículo clasifica las edificaciones en 4 grupos: (1) locales que deben ser totalmente aislados; (2) locales parcialmente aislados; (3) locales sin exigencias acústicas; y (4) locales ruidosos. Este artículo se limita a indicar que:

“Los locales incluidos en el primer grupo en su totalidad y los del segundo grupo que se encuentren ubicados en barrios con alto nivel sonoro medio, de acuerdo con la clasificación que adopte la Dirección de Obras Municipales, deberán someterse a las exigencias establecidas en las Normas Oficiales sobre condiciones acústicas de los locales”

Artículo 4.1.5 – OGUC

Por otra parte, el artículo 4.1.6 es más específico en cuanto a las exigencias para espacios habitacionales y establece los requisitos acústicos mínimos que deben cumplir los elementos que separan unidades de vivienda, sean estas pertenecientes a edificios colectivos, edificaciones continuas, pareadas o contiguas a recintos no habitables.

Estos elementos se pueden clasificar en elementos verticales y horizontales, cada uno con

distintas exigencias y alternativas para cumplir con los parámetros establecidos. La primera alternativa es optar por una solución inscrita en el Listado Oficial de Soluciones Constructivas para Acondicionamiento Acústico, mientras que la segunda opción es demostrar el cumplimiento de los requerimientos de una nueva solución, tal como se indica la Tabla 7.4. Cabe mencionar que, a la fecha, no se exigen requerimientos de absorción acústica.

TABLA 7.4 - Requerimientos acústicos de artículo 4.1.6 de la OGUC.

Elemento ¹⁾	Requerimiento Normativo	Informe de ensayo	Informe de inspección ²⁾
Horizontales y verticales	$R_w + (C \circ C_{tr}) \geq 45[\text{dB(A)}]$	NCh2786 e ISO 717-1 ³⁾	NCh2785 e ISO 717-1
Horizontales	$L_n \leq 75[\text{dB}]$	ISO 140-6 e ISO 717-2	ISO 140-7 e ISO 717-2

NOTA 1 Elementos horizontales con exigencia acústica en CLT pueden ser entrepisos acústicos y techumbres. Elementos verticales corresponden a muros divisorios.

NOTA 2 Técnicamente los informes de inspección son medios de verificación, no de validación. No obstante, en la OGUC son una alternativa válida para el cumplimiento de las exigencias del art. 4.1.6

NOTA 3 Las normas ISO indican la ponderación para los valores obtenidos según las normas NCh. Esta ponderación se realiza mediante factores de seguridad C o C_{tr} para adaptar el espectro de frecuencias según la fuente emisora de ruido.

En base a estos requerimientos por OGUC, las únicas normas oficiales relativas al diseño acústico son la NCh2785-Of.2003 y la NCh2786-Of.2003.

7.2.2 Normativas complementarias para el cálculo del desempeño acústico

Si bien la OGUC indica las normas chilenas que son obligatorias, otras normas chilenas también presentan recomendaciones y métodos estandarizados para un diseño acústico más especializado, que el usuario puede requerir consultar según las necesidades particulares de su proyecto. Algunos instrumentos utilizan estas normas, como la Certificación de Edificios Sustentables (CES). La Tabla 7.5 agrupa las normas chilenas de diseño acústico según su alcance.

TABLA 7.5 - Normativas chilenas para el diseño acústico según su alcance.

Alcance	Normas
Evaluar el comportamiento de edificios de uso habitacionales	Serie NCh352 NCh3464
Estimar el desempeño acústico de la edificación a partir del desempeño de los elementos constructivos	Serie NCh3307/ISO 12354
Medir la aislación de elementos en laboratorio	NCh2786 y serie NCh-ISO10140
Medir la aislación aparente en terreno	NCh2785 y serie NCh-ISO16283

NOTA En negrita las normas oficiales.

Entre estas normas, el Anexo F de la NCh3307-1-2020 incluye un apartado específico para las uniones de CLT. Este apartado presenta las siguientes ecuaciones para estimar el índice de reducción vibratoria K_{ij} para los puntos de flanqueo, como se introdujo en la sección 7.1.2.2.

Uniones en forma de T	Uniones en forma de cruz
$(7.3) \quad K_{13} = 22 + 3,3 \cdot \log\left(\frac{f}{f_k}\right)$ $(7.4) \quad K_{23} = 15 + 3,3 \cdot \log\left(\frac{f}{f_k}\right)$	$(7.5) \quad K_{13} = 22 + 3,3 \cdot \log\left(\frac{f}{f_k}\right) + 10 \cdot M$ $(7.6) \quad K_{24} = 23 + 3,3 \cdot \log\left(\frac{f}{f_k}\right)$ $(7.7) \quad K_{14} = 18 + 3,3 \cdot \log\left(\frac{f}{f_k}\right)$

en que:

f = frecuencia central de la banda, en [Hz];

f_k = 500 [Hz]

M = $\log\left(\frac{m'_{\perp,i}}{m'_i}\right)$

m'_i = masa por unidad de superficie del elemento i en la trayectoria de transmisión i_j , en [kg/m^2];

$m'_{\perp,i}$ = masa por unidad de superficie del otro elemento, perpendicular, que forma parte de la unión, en [kg/m^2].

Si bien estas ecuaciones están actualmente estandarizadas nacional e internacionalmente, la investigación científica discrepa de los valores resultantes de estas fórmulas al no ser coherentes con los resultados experimentales (Di Bella & Mitrovic, 2020). No obstante, aún no hay consenso sobre nuevas propuestas que representen mejor la realidad del CLT.

REFERENCIAS

CIM UC. (2021). *Manual de Soluciones Constructivas*.

Di Bella, A., & Mitrovic, M. (2020). Acoustic characteristics of cross-laminated timber systems. In *Sustainability* (Switzerland) (Vol. 12, Issue 14). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su12145612>

MINVU. (2024). ED13-2024 *Listado Oficial de Soluciones Constructivas para Acondicionamiento Acústico del Ministerio de Vivienda y Urbanismo*.

Morandi, F., De Cesaris, S., Garai, M., & Barbaresi, L. (2018). Measurement of flanking transmission for the characterisation and classification of cross laminated timber junctions. *Applied Acoustics*, 141, 213–222. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.07.009>

NCh2785-Of.2003 Acústica - Medición de Aislación Acústica En Construcciones y Elementos de Construcción - Mediciones En Terreno de La Aislación Acústica Aérea Entre Recintos (2003). <https://tipbook.iapp.cl/ak/7ba2f4bd8e4ba3715cad4afabda5061914006c38/embed/view/nch2785>

NCh2786-Of.2003 Acústica - Medición de Aislación Acústica En Construcciones y Elementos de Construcción - Mediciones En Laboratorio de La Aislación Acústica Aérea de Elementos de Construcción (2003). <https://tipbook.iapp.cl/ak/7ba2f4bd8e4ba3715cad4afabda5061914006c38/embed/view/nch2786>

NCh3307-1-2020 Acústica de La Edificación – Estimación Del Desempeño Acústico de La Edificación a Partir Del Desempeño de Los Elementos – Parte 1: Aislamiento Acústico a Ruido Aéreo Entre Recintos (2020). www.inn.cl

Stora Enso. (2020). *Soundproofing for CLT*.



CAPÍTULO 8

DURABILIDAD Y PRESERVACIÓN

Independiente del tipo de material, sistema constructivo o tipo de construcción, un buen diseño de cualquier proyecto considera siempre la durabilidad de este. La durabilidad hace referencia a la capacidad de un producto, componente o proyecto para realizar sus funciones estructurales, de ser-viciabilidad, de confort y/o estéticas, a un nivel requerido de rendimiento durante un periodo de tiempo de diseño, bajo la influencia de las acciones ambientales (CSA, 2019) (Foliente et al., 2002)

Esto quiere decir, que el planteamiento de la durabilidad de un proyecto siempre debiese empezar por las preguntas básicas: ¿de qué estoy diseñando su durabilidad?; ¿para qué funciones?; ¿cuál de

estas funciones es la más restrictiva?; ¿cuánto es el tiempo esperado para cumplir con estas funciones?; ¿en qué estado quiero que esté al término de ese tiempo?; ¿quién(es) deteriora(n)? El conjunto de respuestas a estas preguntas es la entrada para determinar el nivel de riesgo al que estará sometido el elemento o proyecto.

Este capítulo se enfoca en aquellos profesionales que ya tienen conocimientos teóricos básicos del diseño y construcción en madera, particularmente sobre su anatomía, durabilidad y protección. En caso de que el usuario quiera revisar en mayor profundidad estos conceptos preliminares, se recomiendan los documentos "[Guía de operación de edificaciones en madera](#)" (CIM UC, 2021a) y "[Manual de soluciones constructivas en entramado ligero en madera](#)" (CIM UC, 2021b).

Dicho esto, el presente capítulo se estructura mediante un repaso de los conceptos teóricos y técnicos fundamentales, que sirven como base para luego comprender los requerimientos y actualizaciones normativos, asociados a la durabilidad y protección del CLT. En primer lugar, la sección 8.1 repasa la durabilidad natural de la madera y los agentes de deterioro. Posteriormente las secciones 8.2 y 8.3 presentan 2 de las principales formas, no excluyentes, de mejorar la durabilidad del CLT, mediante medidas constructivas y tratamiento químico respectivamente. Luego, la sección 8.4 presenta los requerimientos normativos nacionales⁴⁷ aplicables al CLT y las medidas normativas que se están empleando internacionalmente.

La Figura 8.1 ilustra un marco conceptual del diseño de la durabilidad de la madera en general, relacionando los distintos temas mencionados anteriormente y destacando aquellos que se desarrollan en este capítulo. Este marco conceptual no es una hoja de ruta normativa, sino que una elaboración propia de la mirada universal de la durabilidad de la madera y debe interpretarse como tal, habiendo tanto recomendaciones como aspectos obligatorios que deben ceñirse a las normativas aplicables.

47. Este capítulo se redactó utilizando la normativa chilena vigente a la fecha de publicación de esta guía. Para referencias con fecha, sólo se aplica la edición citada. Para referencias sin fecha se aplica la última edición del documento referenciado.

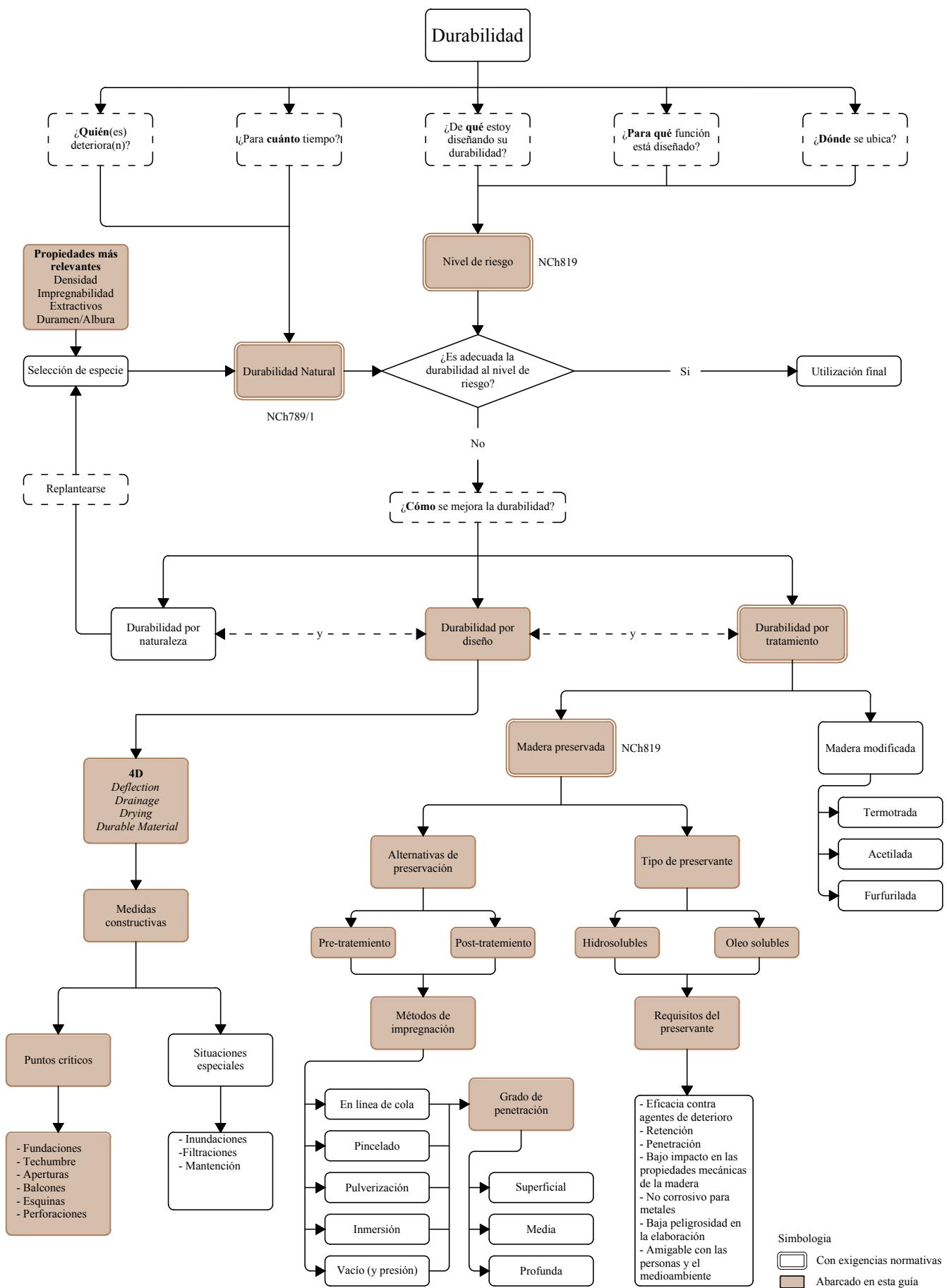


Figura 8.1 - Marco conceptual de durabilidad de la madera. Se destacan los conceptos abarcados en el presente capítulo (elaboración propia).

8.1 DURABILIDAD NATURAL Y PROPIEDADES INTRÍNSECAS DE LA MADERA

Lo primero a tener en claro al diseñar la durabilidad de un producto o componente de madera, es entender la diferencia entre la **durabilidad natural de la especie** y la **durabilidad conferida** al elemento. La primera indica la resistencia intrínseca de la madera frente a los distintos organismos xilófagos (Figura 8.3), mientras que la segunda hace referencia a un tiempo prolongado de resistencia que se puede lograr mediante medidas constructivas o un tratamiento protector.

Algunas de las cualidades que influyen la durabilidad natural de la madera son la composición de su duramen, su densidad, contenidos extractivos (aceites naturales, resinas), tamaño de la fibra (espacio donde el agua y distintos agentes se pueden almacenar) y propiedades antimicrobianas. Dicho esto, es lógico que la durabilidad natural varía, en primera instancia, según la especie. Sin embargo, también puede variar dentro de una misma especie – como es el caso de la diferente durabilidad que puede presentar la madera procedente de plantaciones de crecimiento rápido en comparación a la procedente de bosques naturales – y varía de una parte a otra de la misma madera, es decir, entre el duramen y la albura (Touza, 2013).

En Chile, esta propiedad se determina y clasifica según la norma NCh789/1, la cual recientemente fue actualizada y se trata en la sección 8.4.

Tal como se mencionó anteriormente, la durabilidad natural es una resistencia respecto a la degradación

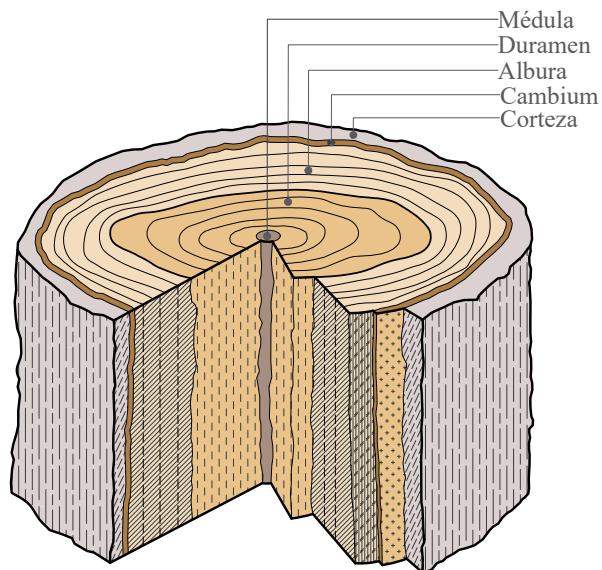


Figura 8.2 - Partes del tronco de un árbol

biológica producida por los organismos xilófagos. Sin embargo, cabe recordar que estos no son los únicos agentes de deterioro de la madera. La Figura 8.3 agrupa y menciona los diferentes agentes de degradación de la madera. Para más información respecto a estos, se recomienda revisar las referencias (CIM UC, 2021a) y (Touza, 2013).

Adicionalmente a las cualidades anatómicas mencionadas anteriormente, una de las propiedades intrínsecas más relevantes de la madera en lo relativo a la durabilidad, es la **impregnabilidad**, la cual se define como la capacidad que presenta una especie de madera a la penetración de un líquido (por ejemplo, de un preservante). Al igual que la durabilidad natural, no solo depende de la especie, sino que es distinta para la albura y el duramen.

AGENTES DE DEGRADACIÓN DE LA MADERA

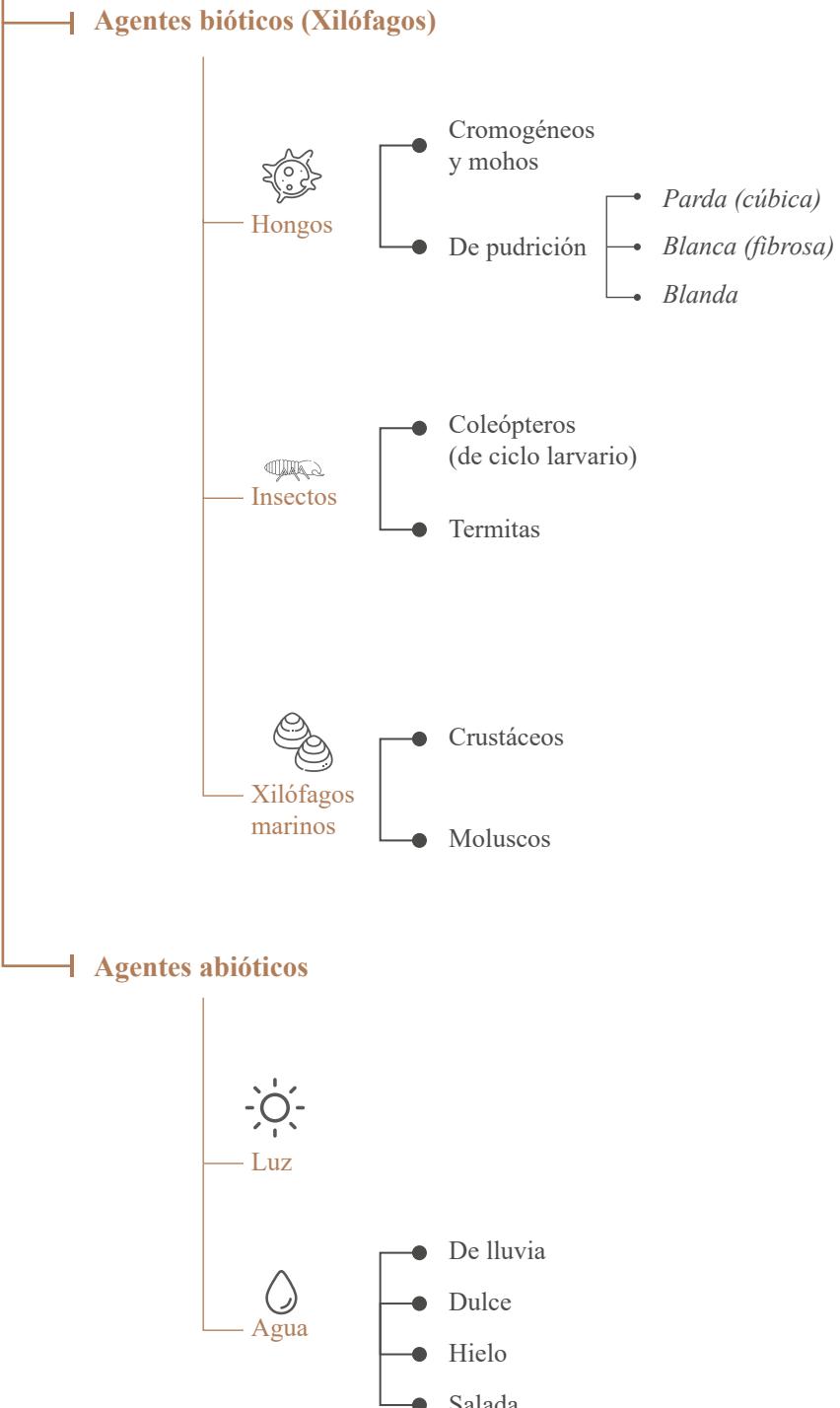


Figura 8.3 - Agentes de degradación de la madera

8.1.1 Características propias de la durabilidad del CLT.

Por su propia composición, el CLT se beneficia de las mismas cualidades inherentes de la especie de madera con la que se fabrica. Esto significa que conserva propiedades como la densidad, durabilidad e impregnabilidad de las láminas.

No obstante, su composición y masividad también le otorgan al CLT algunas características distintivas con respecto a otros productos de madera de menor sección. Es conocido que la madera es notoriamente más permeable en la dirección longitudinal que en las transversal y radial, por ende, la configuración perpendicular de las láminas en un panel de CLT siempre implicará una permeabilidad diferente para cada cara menor y dependiente de si el panel es de armado longitudinal o transversal (ver Figura 8.4) (Ayanleye et al., 2023)

Una de las consecuencias de esta característica física de un panel de CLT, es que tiende a secarse con mayor lentitud en comparación a productos de madera menos masivos, lo cual hace que no sea recomendable su uso en ambientes expuestos a humedad prolongada. Por otra parte, al igual que para el MLE, el adhesivo implica desafíos y consideraciones especiales, particularmente porque genera una interfaz relativamente más impermeable que la madera, lo cual repercute no solo en el secado, sino que también en la penetración de preservantes cuando el tratamiento es posterior al encolado (Tascioglu et al., 2003).

Alrededor del mundo, el CLT es mayormente fabricado en coníferas de baja durabilidad, lo que lo

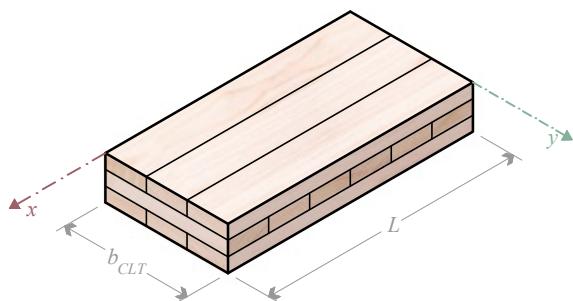
hace susceptible a ataques de agentes xilófagos al estar expuesto a humedad prolongada (Ayanleye et al., 2023), por lo que se hace prácticamente indispensable tomar una estrategia de diseño de la durabilidad de proyectos que se materialicen con este producto.

8.1.2 ¿Cómo mejorar la durabilidad de un componente o proyecto?

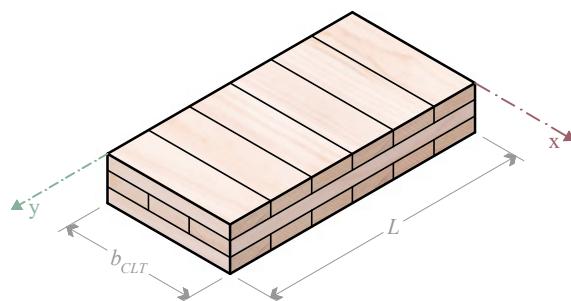
Cuando la durabilidad natural del componente que se está evaluando no es suficiente para proporcionar el rendimiento de vida útil requerido por las condiciones del proyecto, se requerirá alguna medida de mejora de durabilidad. Mundialmente se reconoce que estas medidas se pueden agrupar en 3 métodos: (1) durabilidad por naturaleza; (2) durabilidad por diseño; y (3) durabilidad por tratamiento.

Estos 3 métodos en ningún caso son excluyentes, sino que, por el contrario, en muchas ocasiones una combinación de estos es el escenario ideal para lograr una durabilidad considerable, como el caso de iglesias noruegas de más de 800 años (Larsen & Marstein, 2000).

El primer método, la **durabilidad por naturaleza**, significa replantearse la especie elegida y tomar ventaja de su composición natural y las propiedades introducidas anteriormente. Sin embargo, cabe mencionar que, a la fecha, en Chile se comercializa CLT únicamente fabricado con Pino Radiata, por lo que mejorar la durabilidad por naturaleza aún no es una alternativa comercialmente viable, razón por la cual no se profundiza en esta guía.



a) Panel longitudinal



b) Panel transversal

Figura 8.4 - La permeabilidad e impregnabilidad de un panel de CLT depende en gran medida de la orientación de las capas internas.

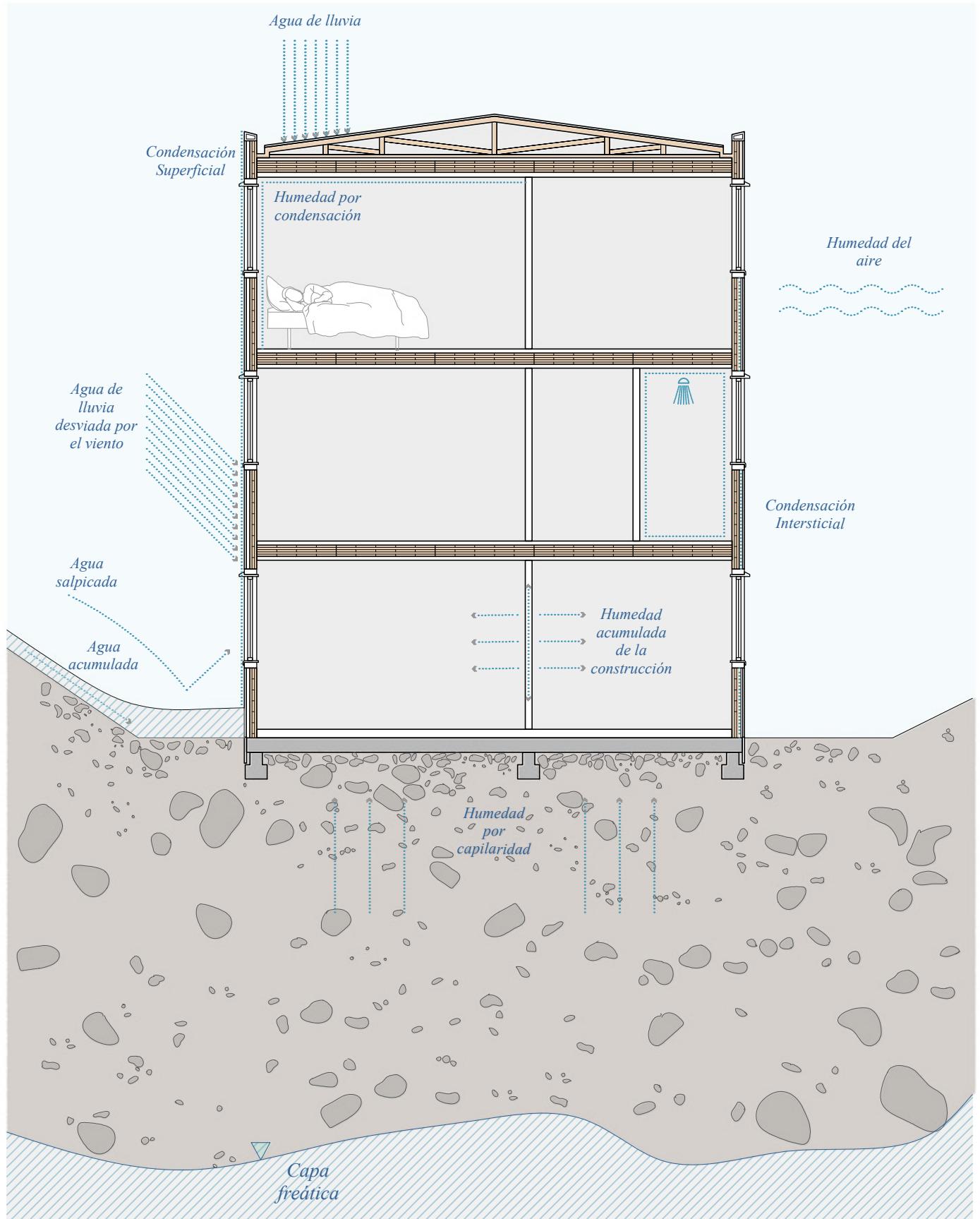


Figura 8.5 - Fuentes de humedad

8.2 DURABILIDAD POR DISEÑO - MEDIDAS CONSTRUCTIVAS DE PROTECCIÓN DEL CLT

La durabilidad por diseño se refiere a la protección pasiva de la madera, a través de medidas constructivas que modifican favorablemente el entorno inmediato del elemento y que suelen ser complementarias a las medidas activas como el tratamiento químico o molecular del material. Este método es una de las estrategias más comunes y efectivas para lograr durabilidad, al centrarse en evadir, manejar y controlar el primer eslabón del deterioro de la madera: la humedad.

En la sección 8.2.1 se aborda en primer lugar el reconocimiento de los mecanismos de entrada de humedad a las estructuras de CLT y posteriormente cómo lograr tener un control y manejo de esta, a través de distintas estrategias de diseño. Luego, en la sección 8.2.2, se aplican estas estrategias de manera específica como medidas constructivas para distintos puntos críticos de la edificación, en los que es importante aplicar criterios de durabilidad para asegurar que la obra cumpla con la vida útil para la cual fue diseñada.

8.2.1 Mecanismos de entrada, control y salida de la humedad

Para garantizar la durabilidad de las estructuras de CLT, es fundamental considerar los agentes que afectan su integridad (ver Figura 8.3). Entre los agentes abióticos, se puede decir que el agua es el factor de deterioro más importantes, por propiciar un ambiente para el desarrollo de otros agentes de degradación. Por lo tanto, es esencial considerar un adecuado manejo de la humedad en el diseño. El control de humedad se define como el proceso que busca equilibrar los mecanismos de entrada de humedad (absorción) y los mecanismos de eliminación de humedad (secado) (FPI Innovations, 2013). Dicho esto, en primer lugar, es importante reconocer los distintos mecanismos de entrada de humedad que se podrían presentar en el lugar de emplazamiento de la estructura de CLT y de cada elemento en particular, y así poder diseñar las medidas constructivas que respondan de mejor

manera a los requerimientos de durabilidad.

8.2.1.1 Mecanismos de entrada de humedad

Los mecanismos de entrada de humedad al sistema se pueden agrupar en dos tipos: (1) mecanismos por humedad exterior o (2) por humedad interior. La **humedad exterior** proviene de fuentes como la lluvia, humedad del suelo, nieve, humedad del aire cálido, o de elementos próximo a la edificación que contengan agua. Un factor adicional que considerar es el **viento**, cuya frecuencia e intensidad pueden ser determinantes en la cantidad de agua que puede afectar la edificación. Por otro lado, la **humedad interior**, se genera, en el corto plazo, por faenas húmedas en la etapa de construcción y, posteriormente, por la ocupación de la edificación. Para más información respecto a los mecanismos de entrada de la humedad, se recomienda revisar la referencia (CIM UC, 2021a).

Además de los mecanismos mencionados, existen aquellos causados por accidentes, como daños en tuberías y los efectos provocados por los sistemas de protección activa contra incendios. Estos mecanismos no se abordan en esta sección, ya que la solución para estos eventos puntuales radica en la elaboración de protocolos que permitan dar una respuesta oportuna a dichas eventualidades.

8.2.1.2 Mecanismos de control y salida de la humedad - Estrategia de las 4D

El manejo de la humedad en la envolvente de una edificación es un proceso que se apoya en varios mecanismos para evitar o eliminar el agua y prevenir eventuales daños. Para un diseño eficaz del control del ingreso de agua desde el exterior hacia la estructura se recomienda el uso de la estrategia de redundancia, la cual consiste en múltiples líneas de defensa de distinto funcionamiento pero que comparten este mismo objetivo (CIM UC, 202a). Estas líneas de defensa se conocen como las 4D y corresponden a las siguientes estrategias:

- 1D. Desviación (Deflection)** “Que no entre el agua”
La desviación efectiva del agua es la primera línea de defensa contra el deterioro. Si el agua se puede desviar antes que impacte y entre en contacto con la madera, las otras estrategias son significativamente menos necesarias a

absorber agua. Esto se puede lograr mediante un diseño adecuado de la orientación de la estructura, fachadas, aleros, cubiertas, voladizos, sistemas de recolección de agua, tapajuntas y otros elementos constructivos que desvíen el agua de la estructura.

2D. Drenaje (Drainage) “Si entra, que pueda salir”

El drenaje permite que el agua fluya por gravedad y se evague rápidamente. Pese a los esfuerzos por evitar que el agua alcance la estructura (desviación), es importante asegurar que, en caso de que entre, salga sin dificultad, evitando así la acumulación de humedad que podría comprometer la integridad y función del CLT. En su forma más simple, esto se logra mediante la adición de un plano de drenaje dentro del paquete constructivo de muro o techo, normalmente ubicado entre la cara exterior del panel de CLT y el aislante. Este plano de drenaje comúnmente consiste en una barrera de humedad, la cual debe funcionar en combinación con hojalaterías, láminas metálicas, botaguas, tapajuntas y cintas de sellado (CIM UC, 2021a).

3D. Secado (Drying) “Si no puede drenar, que pueda secarse”

El secado después de una exposición al agua es fundamental para prolongar la vida útil del CLT. Aun cuando se implementen sistemas de desviación y drenaje, en ciertos puntos críticos (ver 8.2.2) es inevitable que, en algún momento, la madera pueda estar expuesta al agua. En estos casos el diseño debe permitir una ventilación y un secado rápido para evitar que la humedad quede atrapada en la estructura. Algunas medidas para lograr esto son, frente a la humedad exterior, fachadas ventiladas; y frente a la humedad interior, dejar el CLT expuesto.

4D. Material Duradero (Durable Material) “Que resista mientras se seca”

El último principio de control de la humedad exterior es usar materiales duraderos, bien

sea por su durabilidad natural (ver sección 8.1) o durabilidad conferida, permitiendo manejar la permanencia de dicha agua sin producir efectos negativos hasta que esta se seque. Esto es particularmente importante en sectores donde haya elementos de madera que tengan un mayor riesgo de permanecer húmedos en casos de ingreso de agua, o que estén en contacto con elementos que puedan humedecerse.

Estos mecanismos de control de humedad son fundamentales para prolongar la vida útil de las estructuras de CLT y asegurar su durabilidad, evitando problemas que puedan comprometer la integridad del sistema constructivo.

8.2.2 Medidas constructivas para la durabilidad - Puntos críticos

Teniendo clara la estrategia de redundancia para el control de humedad, es relevante identificar los puntos críticos de la edificación, los cuales se definen en función de la probabilidad de que ocurran eventos que causen deterioro. En la Figura 8.6 se destacan los principales puntos críticos en la envolvente de la edificación que son más susceptibles a exposición prolongada a la humedad o al ataque de agentes de deterioro, y que requieren una atención particular en el diseño. Para cada uno de estos puntos, se presenta en las siguientes secciones una medida constructiva genérica, que contemple las distintas estrategias y consideraciones presentadas en este capítulo, sin excluir la importancia del manejo interior de la humedad y otros riesgos asociados. Los detalles presentados pretenden abarcar recomendaciones para las condiciones más desfavorables y en ningún caso son exhaustivos o normativos. El diseño de cada punto crítico para un proyecto en particular es responsabilidad del projectista, quien debe ejercer su criterio justificado, pudiendo apoyarse en las recomendaciones teóricas expuestas en el presente capítulo.

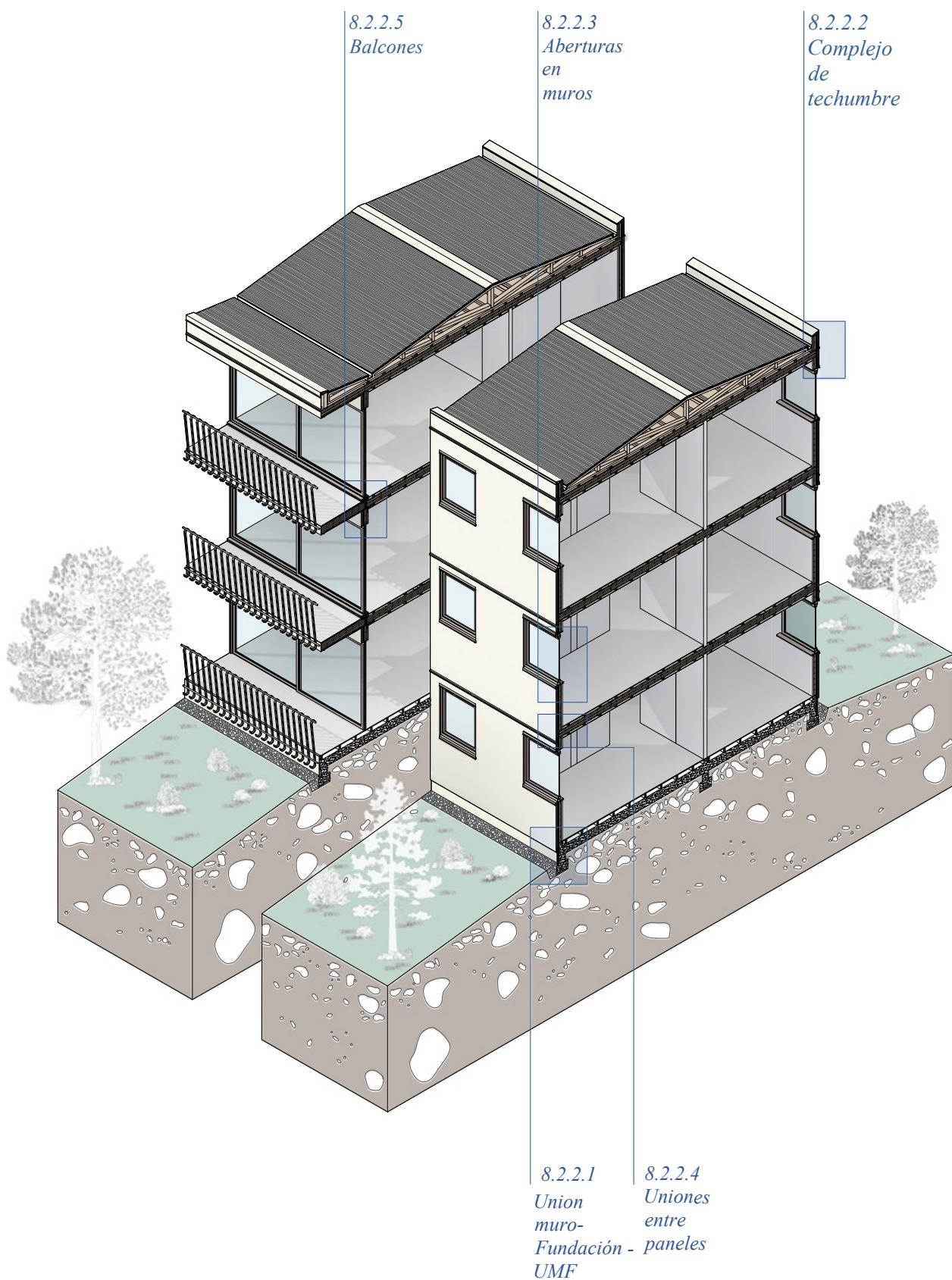
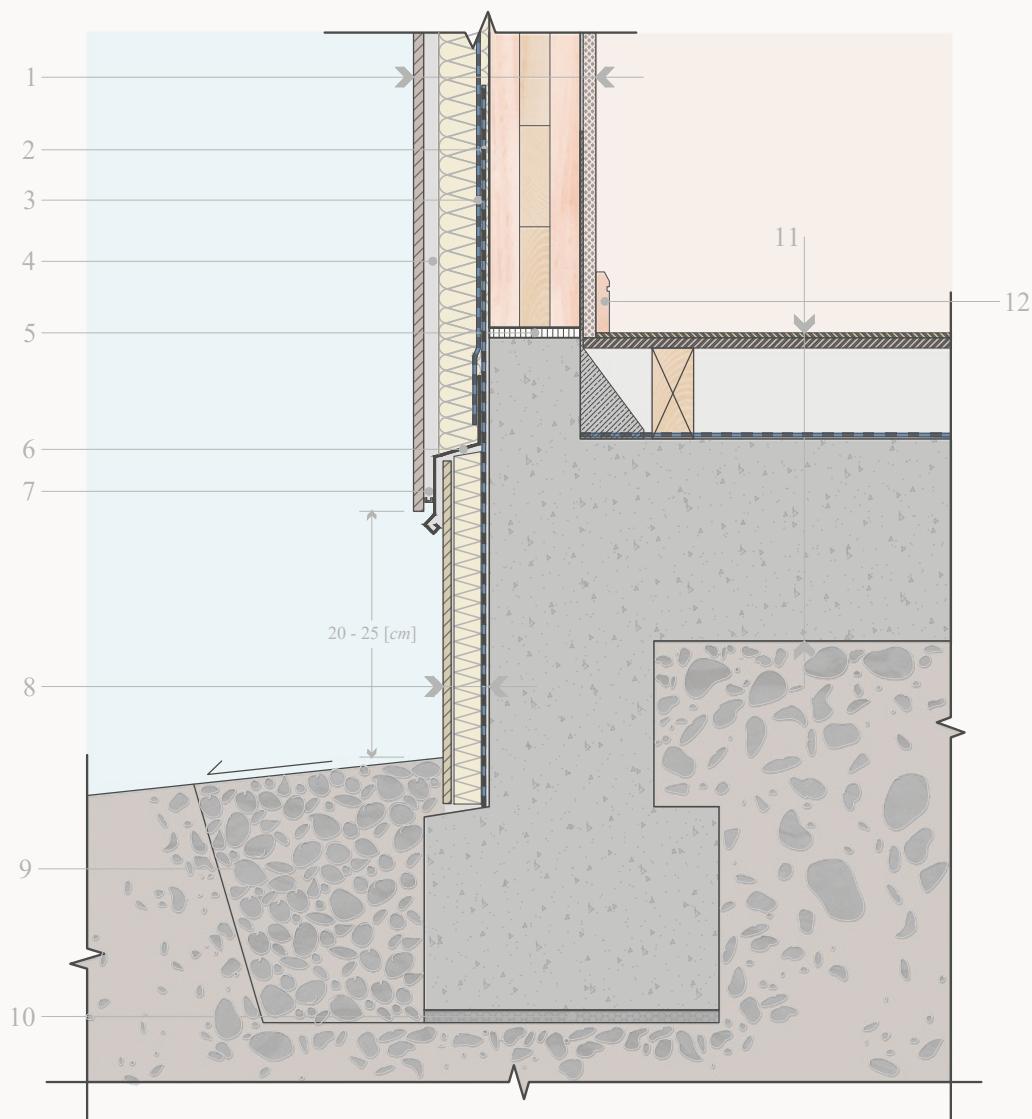


Figura 8.6 - Ubicación de puntos críticos edificación de CLT

Unión Muro-Fundación - UMF



LEYENDA

1. Composición de muro	5. Banda aislante	11. Composición de piso
Revestimiento exterior	6. Hojalatería y corta gotera	Piso de terminación
Aislación térmica /montante	7. Rejilla Anti-insectos	Terciado
CLT	8. Composición aislación sobrecimiento	Montantes
Yeso cartón	Fibrocemento o similar	Membrana impermeabilizante
2. Barrera de humedad	Material aislante de alta densidad	12. Guarda polvo
3. Barrera de humedad	9. Zona de drenaje	Barrera de humedad
4. Cámara de aire	10. Capa de nivelación o compactación	

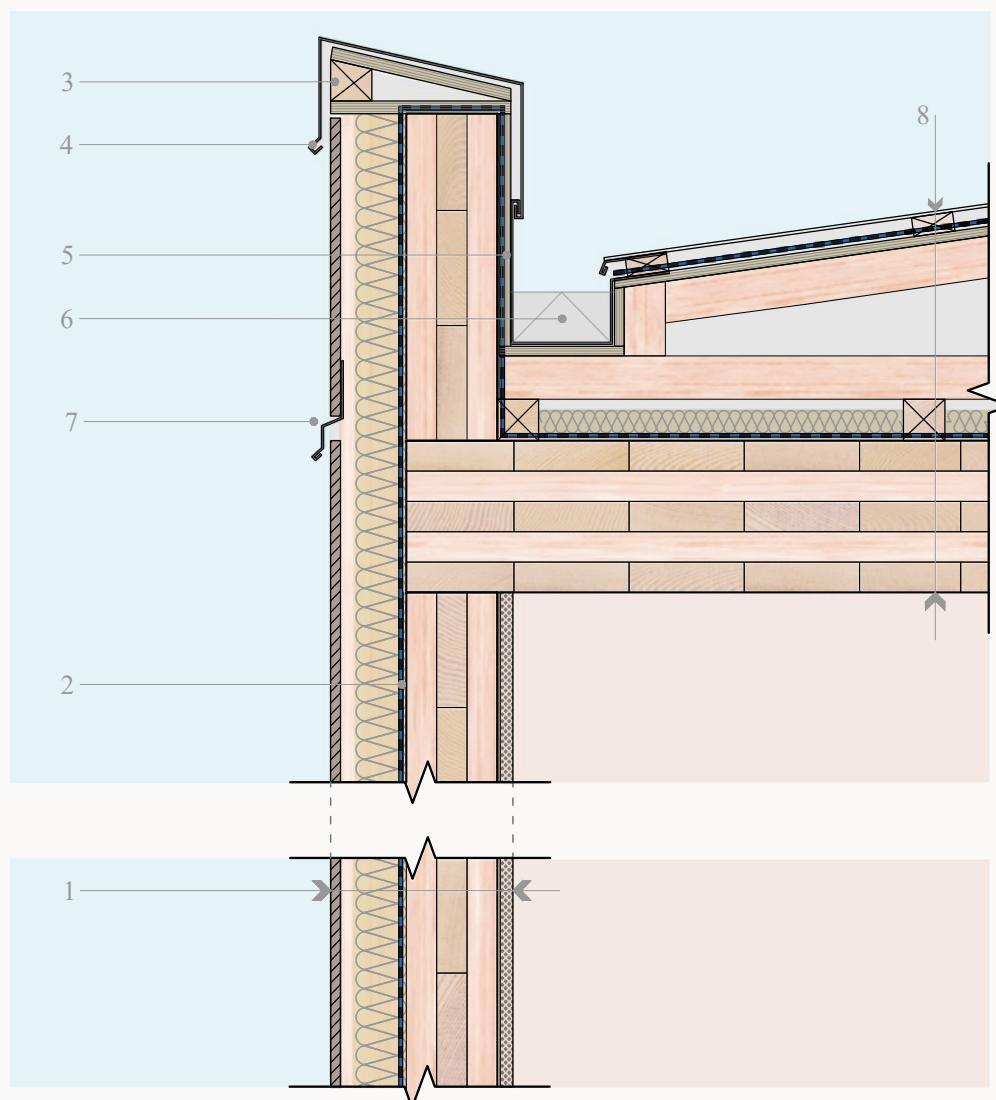
Figura 8.7 - Detalle constructivo tipo para unión muro fundación - UMF

8.2.2.1 Unión Muro-Fundación – UMF

Corresponde al encuentro entre la estructura de CLT con una fundación de hormigón. En este tipo de encuentro, es importante abordar varios aspectos específicos:

- iii. **Protección contra infiltraciones en fundaciones:** se recomienda considerar 2 líneas de protección: (1) entre la humedad del suelo y el hormigón y (2) entre la humedad del hormigón y la madera. La primera línea de protección hace referencia a evitar, en primera instancia, una humedad persistente en las fundaciones, no sólo por la posterior humidificación hacia la madera, sino que también por el mismo deterioro del hormigón armado. Para esto se recomienda distanciar de la fundación todo tipo de elemento vegetal como plantas, árboles o flores que requieran mucho riego; no plantar árboles de grandes raíces, ya que estas pueden romper y obstruir las fundaciones, radieres y tuberías; y mantener los sobrecimientos despejados para su ventilación (CIM UC, 2021a). Para la segunda línea de protección, se debe considerar una junta de sellado para evitar la subida capilar de la humedad del concreto a la estructura de CLT. Se recomienda una banda aislante o un material similar que garantice la protección de la madera.
- iii. **Desviación y drenaje:** se debe evitar que el agua drenada por la fachada se acumule en las inmediaciones de las fundaciones. Algunas medidas pueden ser darle una pendiente al suelo o que este sea lo suficientemente permeable para filtrar el agua a mayor profundidad. En condiciones no favorables, para el secado o drenaje se deben tomar medidas complementarias que impermeabilicen las fundaciones. En este caso, se debe asegurar mantener la continuidad de las barreras, es decir, se requiere una transición entre la fachada y la membrana de impermeabilización del concreto, permitiendo que el agua escurra lejos de los elementos estructurales y no se produzca acumulación.
- iii. **Distanciamiento de inspección:** los sobrecimientos y radieres deben quedar expuestos preferiblemente unos 25 [cm], o al menos 20 [cm], sobre el nivel del terreno natural, para su correcta inspección. Esto también permite tener protección contra la humectación indirecta, como salpicaduras de agua lluvia (CIM UC, 2021a).

Complejo Techumbre



LEYENDA

1. Composición de muro	5. Encamisado de terciado o similar	Cercha
Revestimiento exterior	6. Canaleta hojalatería	Aislación térmica/montante
Aislación térmica /montante	7. Hojalatería de transición	Barrera de humedad
CLT	8. Composición techumbre	CLT
Yeso cartón	Terminación techumbre	Terminación a elección
2. Barrera de humedad	Montante	Barrera de humedad 
3. Perfil inclinación	Barrera de humedad	
4. Corta gotera	Terciado o similar	

Figura 8.9 - Detalle constructivo tipo para complejo techumbre

8.2.2.2 Complejo techumbre

Corresponde al encuentro entre el cielo del recinto más elevado, muro y la cubierta. Para implementar medidas constructivas adecuadas, es importante considerar la morfología de la techumbre diseñada. Las configuraciones más comunes se indican en la Figura 8.8, se recomienda en el caso de elegir la techumbre “plana”, elegir la dirección de drenaje dependiendo del núcleo de la edificación, es importante alejar el agua de los elementos de madera principales de la estructura.

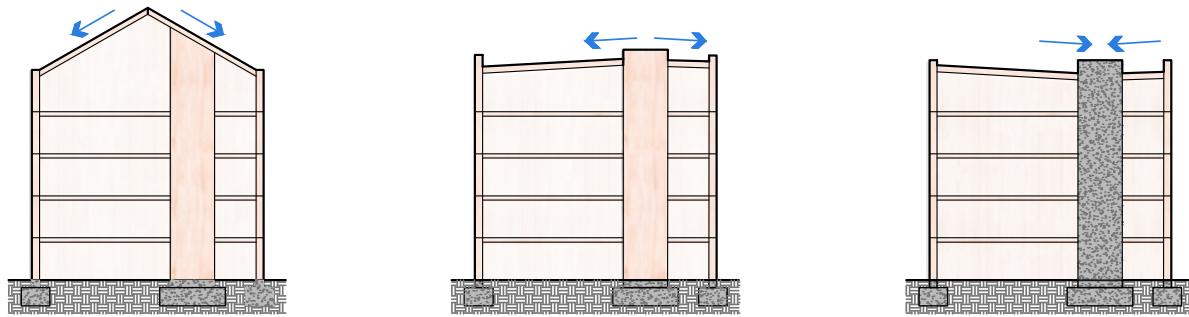
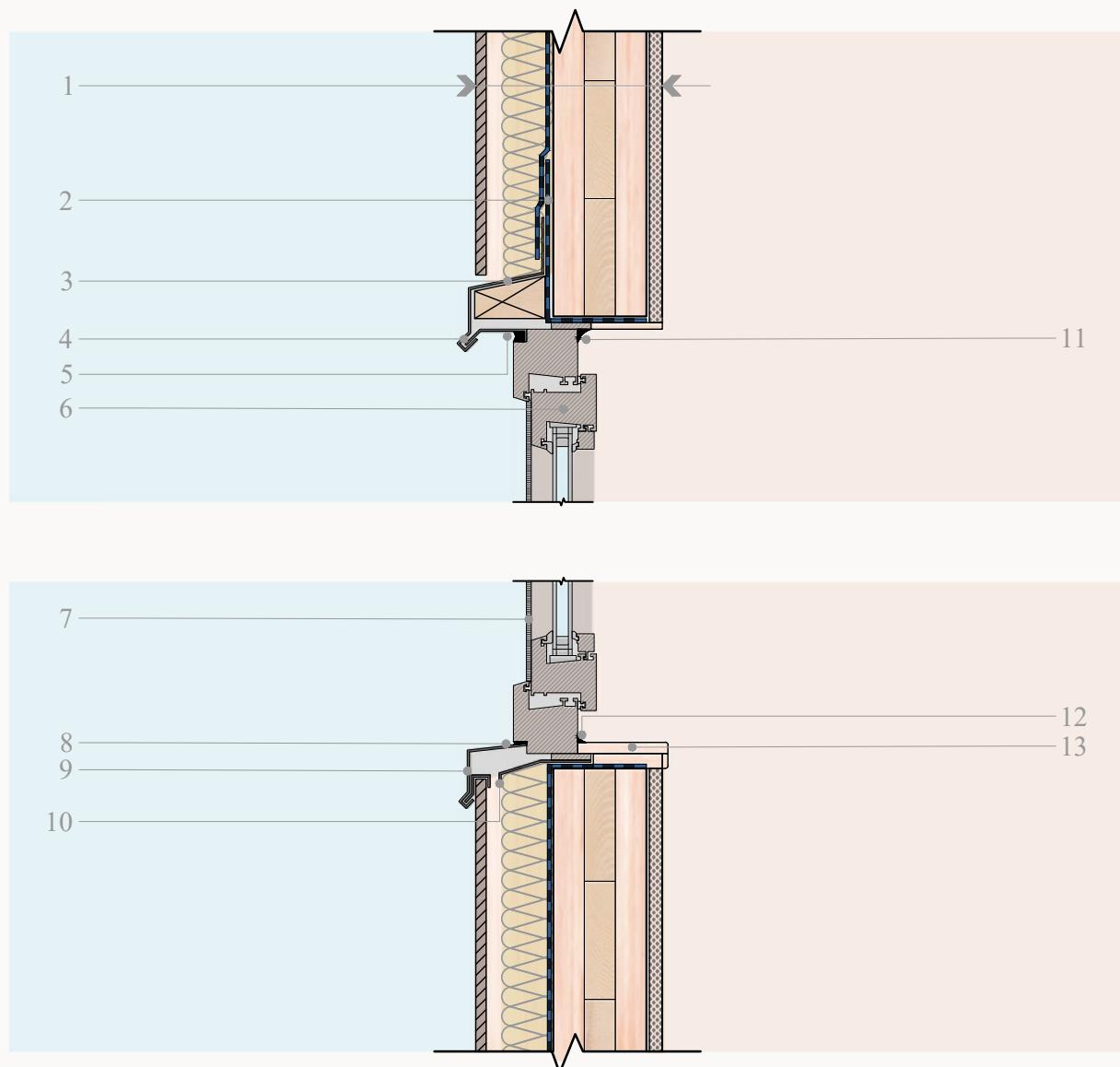


Figura 8.8 - Tipologías de techumbre

En los encuentros de techumbre es importante abordar varios aspectos específicos:

- i. **Materialidad de la cubierta:** Se recomienda utilizar para techumbres “planas” ($<10^\circ$ de inclinación), entramado ligero de madera. Por otro lado, para techos inclinados ($>10^\circ$ de inclinación), es posible utilizar CLT o un entramado ligero de madera.
- ii. **Fallo en la vida útil:** Se debe considerar que los sistemas de impermeabilización aplicados a las cubiertas fallen durante la vida útil. Por este motivo, el diseño debe prevenir la acumulación de agua estancada e incluir medidas para la detección temprana de humedad. Entre estas medidas se incluyen la instalación de salidas de desbordamiento para descargar agua estancada, así como cámaras de inspección en los puntos más bajos.
- iii. **Capacidad de secado reducida:** Las cubiertas, no permiten una gestión de la humedad eficiente, ya que su capacidad para permitir la disipación del agua hacia el exterior es limitada. Cualquier infiltración o fuga tiende a secarse lento, lo que aumenta el riesgo de daños por acumulación de humedad (Wang et al., 2018). Por esta razón, es común utilizar múltiples estrategias de impermeabilización para proteger la estructura. Asimismo, se recomienda implementar sistemas de ventilación inferiores, como entretechos ventilados o cavidades de aire, que faciliten el secado en caso de que ingrese agua (FPInnovations, 2019b).
- iv. **Desviación y Drenaje:** Para garantizar un correcto drenaje del agua, en primera instancia se debe tener la inclinación suficiente para que el agua pueda escurrir con facilidad. También se debe asegurar la continuidad de las barreras resistentes al agua, es decir, la transición entre la fachada y la cubierta. El uso correcto de hojalatería es importante para prevenir la infiltración de agua en cavidades no deseadas.

Aberturas en muros



LEYENDA

1. Composición de muro	3. Protección superior (desviación)	9. Protección inferior inclinada
Revestimiento exterior	4. Corta gotera	10. Segunda protección inferior
Aislación térmica /montante	5. Sello superior exterior	11. Sello interior superior
CLT	6. Ventana	12. Sello inferior interior
Yeso cartón o similar	7. Sello lateral	13. Moldura interior
2. Barrera de humedad	8. Sello inferior	Barrera de humedad

Figura 8.10 - Detalle constructivo tipo para aberturas en muros

8.2.2.3 Aberturas en muros

Al interrumpir la continuidad del muro, las aberturas en edificaciones, como puertas, ventanas e instalaciones aumentan la superficie de contacto con el exterior, aumentando la posibilidad de acumulación o ingreso de agua. Por lo tanto, es importante abordar distintos aspectos específicos.

Puertas

- i. **Altura del umbral:** Los umbrales de las puertas deben estar elevados por encima de la superficie de drenaje para evitar el ingreso de agua en áreas expuestas a lluvia o nieve.
- ii. **Protección y sellado:** Es recomendable utilizar tanto cintas como siliconas, asegurándose de que las indicaciones del producto garanticen la correcta adhesión entre los componentes a proteger y sellar. Este sellado debe realizarse de manera perimetral entre el marco de la puerta y el CLT. También, colocar una membrana bajo del umbral, junto con hojalatería, puede ayudar a desviar el agua y evitar daños por salpicaduras. Elementos complementarios, como un burlete en la puerta, también pueden ser eficaces como estrategia de protección.

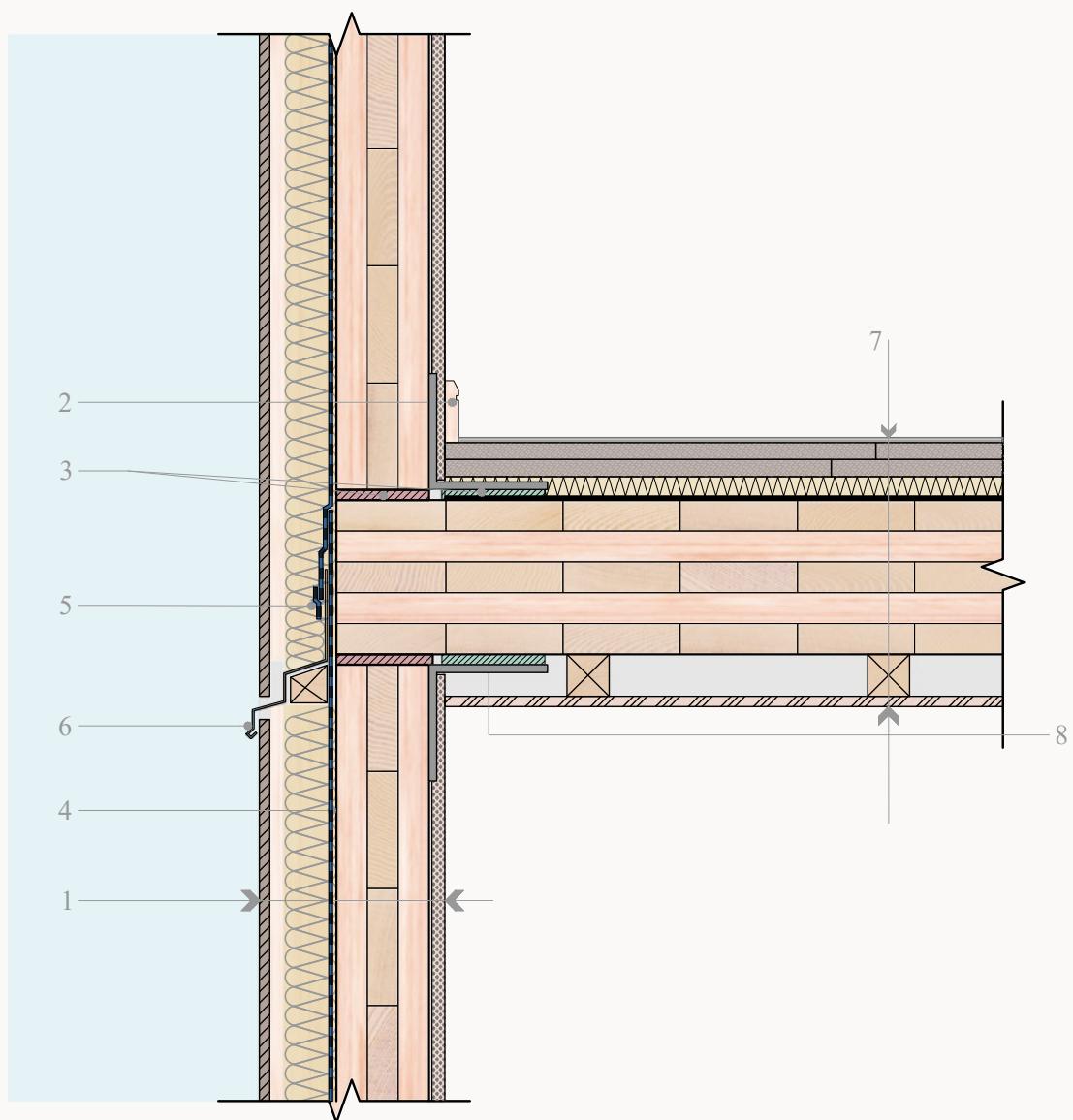
Ventanas:

- i. **Drenaje y control de la humedad:** Al interrumpir la continuidad del muro, las aberturas en edificaciones, como puertas, ventanas e instalaciones aumentan la superficie de contacto con el exterior, aumentando la posibilidad de acumulación o ingreso de agua. Por lo tanto, es importante abordar distintos aspectos específicos.
- ii. **Protección y sellado:** Al interrumpir la continuidad del muro, las aberturas en edificaciones, como puertas, ventanas e instalaciones aumentan la superficie de contacto con el exterior, aumentando la posibilidad de acumulación o ingreso de agua. Por lo tanto, es importante abordar distintos aspectos específicos.

Perforaciones de Sistemas

- i. **Protección y sellado:** Los elementos que perforan la edificación, como *shafts*, canalizaciones internas o ductos sanitarios y eléctricos, deben ser sellados con materiales duraderos y resistentes a fisuras para garantizar la protección frente a infiltraciones. Además, los sellos utilizados, deben permitir inspecciones periódicas, que faciliten la detección temprana de posibles daños (CIM UC, 2021b).

Unión Muro Losa Muro - UMLM



LEYENDA

1. Composición de muro

Revestimiento exterior

Aislación térmica /montante

CLT

Yeso cartón o similar

2. Guarda polvo

3. Banda acústica

4. Barrera de humedad

5. Cinta adhesiva para traslape

6. Hojalatería de transición

7. Composición de piso

Piso de terminación

2x Panel de fibrocemento o similar

Aislación térmica de alta densidad

Barrera de humedad

CLT

Montante

Yeso cartón o similar

8. Anclaje de corte

Barrera de humedad



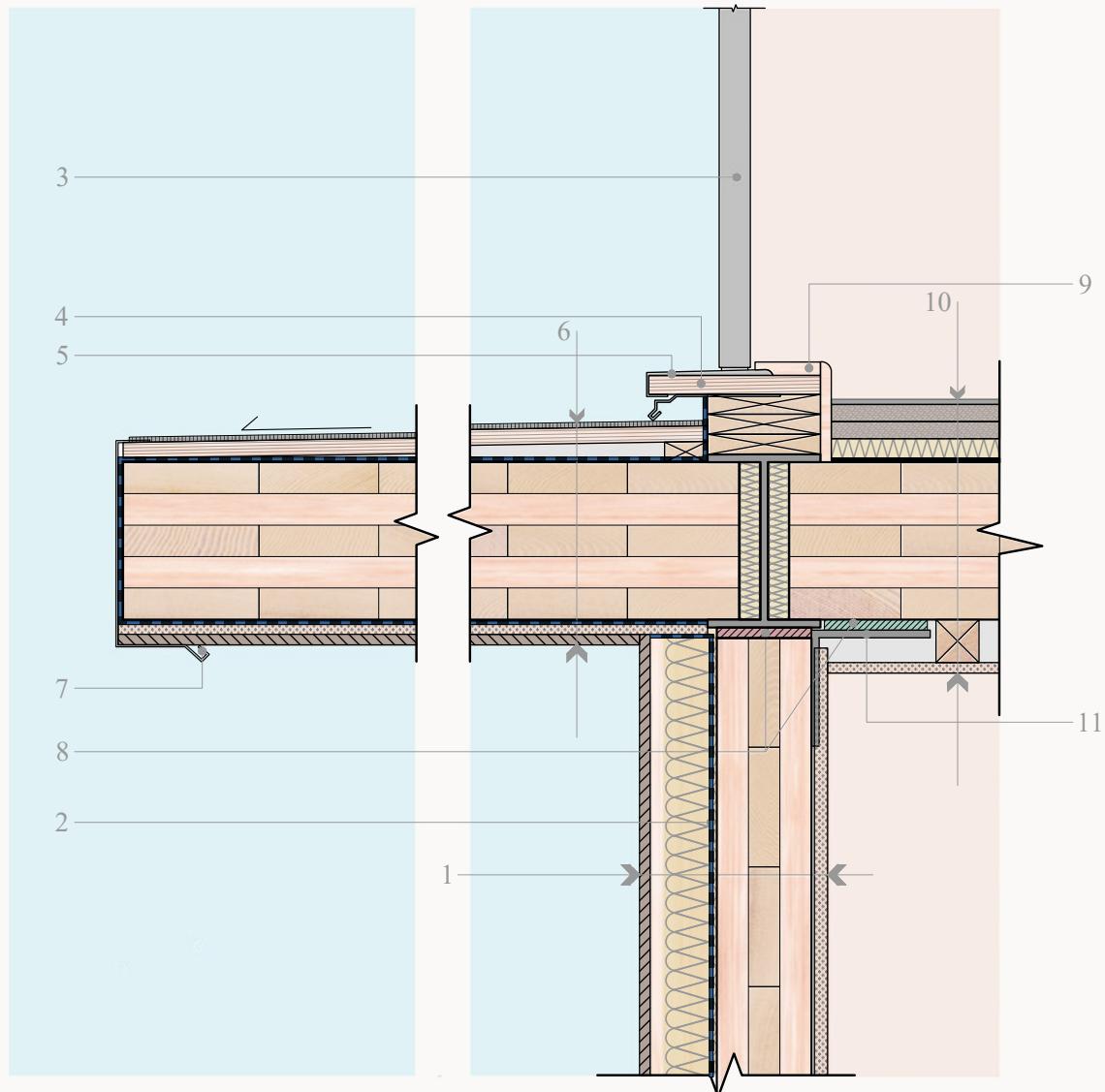
Figura 8.11 - Detalle constructivo tipo para unión muro losa muro - UMLM

8.2.2.4 Unión Muro Losa Muro - UMLM

Las uniones entre paneles de CLT, son puntos donde los elementos convergen, aumentando el riesgo de filtraciones de humedad hacia la estructura principal.

- i. **Protección y sellado:** Para asegurar la continuidad de la protección de los elementos en estas zonas, se recomienda utilizar cinta adhesiva para asegurar la continuidad de la barrera de protección. También se recomienda cerrar todas cavidades en las distintas partes de la solución.
- ii. **Segmentación de elementos:** En edificaciones de mediana y gran altura, se aconseja segmentar el sistema de revestimiento, para que, si falla parte del sistema de drenaje y secado de la fachada, no se comprometa el sistema completo.

Balcones



LEYENDA

1. Composición de muro

Revestimiento exterior	Piso de terminación
Aislación térmica /montante	Terciado o similar
CLT	Barrera de humedad
Yeso cartón o similar	CLT
2. Barrera de humedad	Barrera de humedad
3. Puerta o ventanal	Yeso cartón o similar
4. Terciado o similar	Revestimiento a elección
5. Protección zócalo exterior	7. Protección hojalatería canto CLT
6. Composición balcón	8. Banda acústica
	9. Protección zócalo interior

10. Composición de piso

Piso de terminación	Piso de terminación
2x Panel de fibrocemento o similar	2x Panel de fibrocemento o similar
Aislación alta densidad	Aislación alta densidad
CLT	CLT
Montante	Montante
Yeso cartón o similar	Yeso cartón o similar
11. Anclaje de corte	11. Anclaje de corte
Barrera de humedad	Barrera de humedad

Figura 8.13 - Detalle constructivo tipo para balcones

8.2.2.5 Balcones

Los balcones que sobresalen de la estructura principal están expuestos a mayores riesgos de durabilidad. En edificaciones de CLT, por lo general se utilizan balcones conectados a la estructura principal o como una estructura secundaria independiente, ver Figura 8.12. En cualquier caso, se deben tener en consideración los siguientes aspectos.

- i. **Protección y sellado:** La protección de los balcones debe asegurar una impermeabilidad continua desde la estructura principal hacia el exterior, utilizando una pendiente adecuada y su sistema de drenaje efectivo. Por otra parte, se debe colocar atención en la unión con la estructura principal para prevenir posibles movimientos de humedad hacia la edificación, en este caso se recomienda impermeabilizar esa unión en específico.
- ii. **Altura del umbral:** Los umbrales de las puertas que conectan el interior con el exterior deben estar elevados por encima de la superficie de drenaje para evitar el ingreso de agua y facilitar que su drenaje, evitando así su acumulación y un posible riesgo.
- iii. **Secuencia constructiva:** La secuencia de instalación de los balcones y su protección contra la humedad debe ser coordinada entre los equipos de construcción y diseño. Durante la fase de construcción, un balcón puede ser una fuente significativa de acumulación de humedad debido a su mayor exposición.

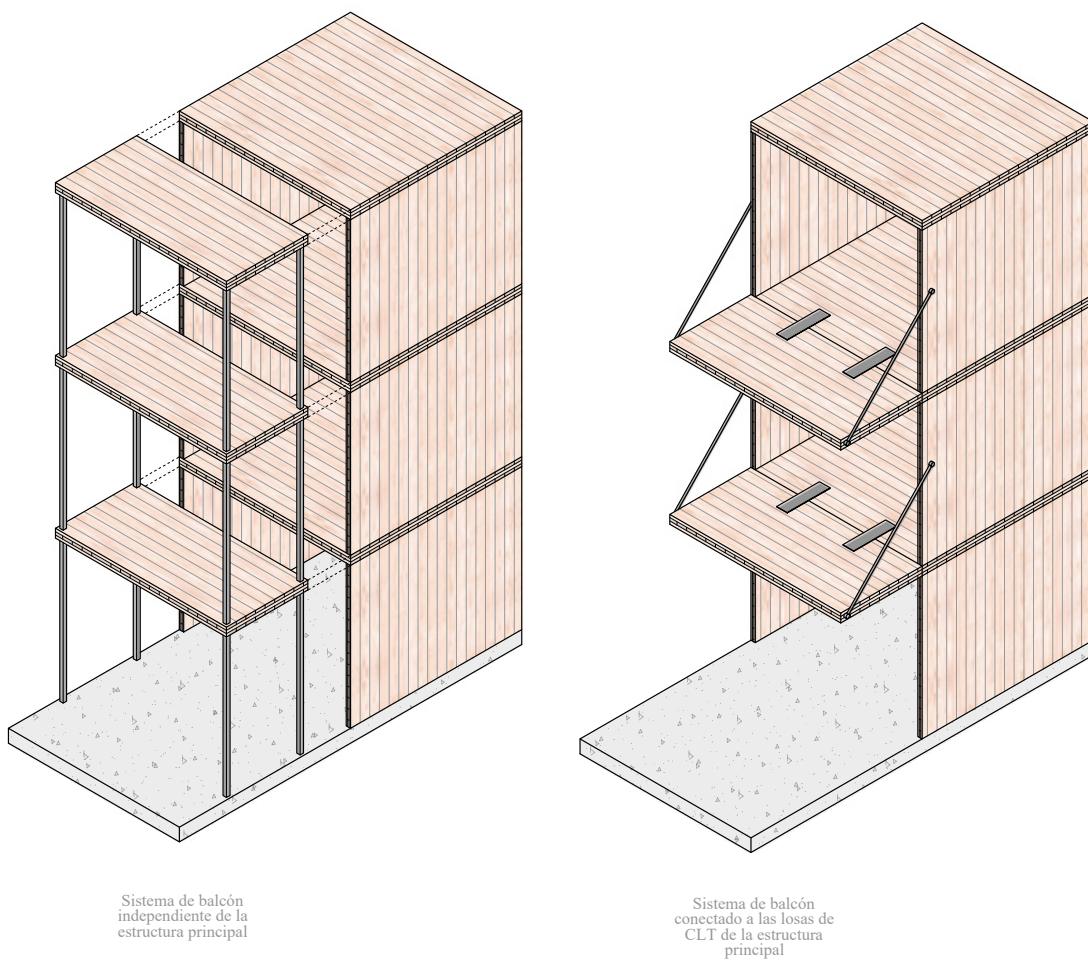


Figura 8.12 - Tipos de conexión de balcones

El diseño adecuado de medidas constructivas, como las anteriormente presentadas, permite reducir el nivel de riesgo de un elemento, habilitando su uso en situaciones que originalmente puede no haber sido permisible. En la sección 8.4.3, se profundiza sobre la normativa nacional asociada a los niveles de riesgo.

8.3 DURABILIDAD POR TRATAMIENTO – MEDIDAS DE PRESERVACIÓN DEL CLT

La experiencia internacional ha demostrado que para la mayoría de los casos en que el CLT no está expuesto, no se requiere ningún tipo de tratamiento, y la madera tiene un nivel aceptable de durabilidad, siempre y cuando se hayan tomado las medidas constructivas correctas (FPIInnovations, 2019b). No obstante, aunque se apliquen las mejores prácticas de durabilidad por diseño y se intente minimizar la exposición del CLT a la humedad, es inevitable que, en ciertas situaciones o zonas críticas, algunas partes de los paneles de CLT queden expuestas a la humedad durante su vida útil (FPIInnovations, 2019b), comúnmente debido a situaciones accidentales, como filtraciones o eventos climáticos extremos, como también por un mal uso del ocupante. En estas ocasiones puede ser beneficioso e incluso necesario la utilización de algún tratamiento para mejorar la durabilidad.

Actualmente, se puede decir que existen dos grandes familias de durabilidad por tratamiento: (1) la **preservación química**, resultando en lo que se conoce como madera preservada; y (2) la **modificación molecular**, resultando por su parte en la madera modificada.

El uso de madera modificada en paneles de CLT (e incluso en otros productos de madera masiva) aún no tiene un respaldo científico suficiente para estandarizar su uso y se requiere mayor investigación sobre su incidencia en las propiedades mecánicas y su capacidad de adherencia (Wang et al., 2018); (Ayanleye et al., 2022), razón por la cual, en esta guía no se profundiza y se recomienda

no hacer uso de este producto en paneles de CLT, sin una cuidadosa investigación. Dicho esto, esta sección se centra en el tratamiento por preservación química.

8.3.1 Preservación química de la madera

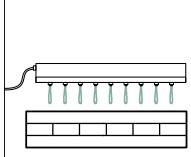
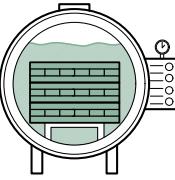
Para entender las particularidades de la preservación química del CLT, es necesario tener claridad de los **métodos de impregnación** de la madera utilizados actualmente en la industria, los cuales se pueden agrupar en 5: en línea de cola, pincelado, pulverización, inmersión y presión. Dependiendo de diversos factores, como el espesor de la pieza, la cantidad de manos aplicadas, el tiempo de exposición al tratamiento, entre otros, con estos 5 métodos se pueden lograr 3 **grados de penetración** distintos: superficial, media y profunda, el cual siempre se debe verificar según la normativa vigente. La Tabla 8.1 ilustra los métodos de impregnación y grados de penetración mencionados.

Entre los 5 métodos de impregnación nombrados anteriormente, todas son aplicables de una u otra forma al CLT, con excepción del tratamiento en línea de cola – utilizado mayormente en tableros de chapas, virutas, fibras o partículas – debido a que son poco efectivos en productos de madera masiva por su baja relación superficie/volumen (Wang et al., 2018). Dicho esto, el resto del capítulo hace referencia a los otros 4 métodos de impregnación restante.

En conocimiento de los métodos de impregnación, existen esencialmente dos alternativas para preservar productos de madera masiva: (1) **pre-tratamiento**, que consiste en tratar las láminas individuales previo al encolado; y (2) **post-tratamiento**, el caso contrario, en que se preserva el producto masivo ya encolado.

En las siguientes secciones se mencionan algunas ventajas y desventajas de ambas alternativas, basado en una revisión bibliográfica hecha por los autores. A la fecha de redacción de esta guía no existe normativa nacional ni internacional acerca de la preservación química del CLT y es nula la información pública sobre experimentación o

TABLA 8.1 - Métodos de impregnación y grados de penetración para la preservación química de la madera.

	Difusión	Presión	
Método de impregnación	 en línea de cola (no aplicable en CLT)	 inmersión	
Grado de penetración	 superficial	 media	 profunda

ensayos en productos nacionales. Esto implica que, en algunos casos, la información recopilada puede no ser directamente atribuida a las especies disponibles en el mercado nacional. Sin embargo, resulta relevante construir este marco integral, para analizar las tendencias internacionales en esta materia.

8.3.2 CLT pre-tratado

Hoy en día, mundialmente se recomienda asegurar una penetración profunda y homogénea en productos de madera masiva, por lo que el CLT pre-tratado es el que ha tomado mayor relevancia tanto en la investigación como comercialmente (Ayanleye et al., 2022).

Similar al MLE, el pre-tratamiento permite la producción de paneles de CLT de prácticamente cualquier tamaño y forma con un tratamiento homogéneo, ya que cada lámina individual es penetrada en el mismo grado por el preservante. Un tratamiento por difusión previo al encolado entregará una baja pero suficiente concentración de preservante para elementos no expuestos a la intemperie, mientras que, un tratamiento por presión entregará una mayor protección y reduce el riesgo de exponer en servicio material no tratado al rebajar y perforar

los miembros encolados (Tascioglu et al., 2003); (Wang et al., 2018).

Sin embargo, el pre-tratamiento también tiene desventajas. Los productos químicos en la superficie de las láminas pueden interferir con la adhesión y el rendimiento de las líneas de pegamento, y se ha comprobado que para ciertas combinaciones de adhesivo-preservante el porcentaje de delaminación incrementa con el nivel de retención (Ayanleye et al., 2023); (Quin et al., 2023). Experimentalmente, se ha demostrado que los adhesivos monocomponentes de poliuretano (PUR) tienen mejor comportamiento frente a la delaminación, en comparación con adhesivos de melamina-formaldehido (MF) y resorcinol-formaldehido (RF) cuando interactúan con preservantes de cobre micronizado tipo C (μ CA-C) (Lim et al., 2020).

Otra consecuencia del producto químico en la superficie de las láminas es que estas se deben cepillar o lijar para lograr una superficie limpia y plana para la adherencia, lo que elimina la parte más tratada de la madera, provocando un desperdicio de material y tiempo. Además, este mecanizado de madera tratada genera polvo con preservante, lo que puede aumentar los riesgos de salud en el

lugar de trabajo (Tascioglu et al., 2003); (Bagheri et al., 2022); (Wang et al., 2018).

En caso de que el pre-tratamiento sea la alternativa utilizada, se debe poner especial atención en asegurar el cumplimiento de los requisitos de adherencia, delaminación y bloque de corte, según la normativa prNCh3732/1.

8.3.3 CLT post-tratado

El post-tratamiento del CLT para prolongar la durabilidad aún es una tecnología que se está estudiando y cuenta con poco respaldo científico, pero con un potencial prometedor (Ayanleye et al., 2022). Esta alternativa ofrece ciertas ventajas, como permitir aplicar el preservante una vez que se han completado todos los cortes, perforaciones y mecanizados, asegurando que todas las superficies expuestas queden protegidas. Además, elimina la necesidad de cepillar o lijar las láminas tratadas, lo que ahorra tiempo y material, y reduce los riesgos de salud asociados al polvo de madera preservada.

Sin embargo, esta alternativa también presenta desventajas. La primera y bastante obvia es que la mayoría de los cilindros de autoclave no están diseñados para los tamaños comerciales del CLT (Quin et al., 2023); (Bagheri et al., 2022), no por su largo, sino que por su ancho. Debido a ello, es ampliamente más común un tratamiento envolvente por difusión (pincelado o pulverizado).

Recientemente, estudios nacionales realizados con pino radiata, con tratamiento envolvente por difusión han mostrado resultados positivos y prometedores para continuar con esta línea de desarrollo⁴⁸. Por otra parte, Wang et al. (2018), indican que este mecanismo de impregnación utilizado posterior al encolado suele ser más superficial, pudiendo proteger frente al moho, pero siendo insuficiente para proteger frente a agentes más agresivos para los que se requiere una mayor penetración. Debido a estas distintas experiencias,

la poca experimentación y documentación de respaldo, es recomendable siempre respaldar el tratamiento utilizado con ensayos de penetración y retención según la normativa vigente.

Otra desventaja del post-tratamiento es la posibilidad de causar deformaciones, grietas y fisuras por ciclos de hinchazón y merma restringidos por el encolado, especialmente cuando se usan tratamientos a base de agua por inmersión (Tascioglu et al., 2003). Esta desventaja también aplica para la MLE, siendo la solución más común que el post-tratado sea con preservantes oleo solubles para evitar estas deformaciones y grietas (Bagheri et al., 2022). Incluso, la normativa canadiense prohíbe post-tratar el CLT con preservantes en base a boro, por ser estos hidrosolubles (CSA 086:19).

También se ha reportado que las interfaces de adhesivo pueden bloquear la difusión del preservante y por ende limitar su penetración (Tascioglu et al., 2003), dejando zonas vulnerables a la descomposición fúngica.

Entre los resultados científicos más prometedores sobre el CLT post-tratado se encuentran los trabajos de (Ayanleye et al., 2023) y (Quin et al., 2023), quienes estudiaron la retención, penetración, delaminación y resistencia al bloque de corte de muestras de CLT de $403,9 \times 675,6$ de 3 y 5 capas, en pino ponderosa (southern yellow pine) post-tratado mediante vacío y presión con CA-C y MCA, obteniendo resultados que se adhieren a las normativas internacionales e identificando la mayor penetración en paneles de armado longitudinal (ver sección 8.1.1).

En caso de que el post-tratamiento sea la alternativa utilizada, se debe poner especial atención en asegurar el cumplimiento de los requisitos de penetración y retención, según la normativa NCh819. Se recomienda fuertemente que la protección sea realizada en fábrica, (posterior a todos los rebajes y perforaciones) y no en terreno (FPIInnovations, 2019b).

48. A la fecha de redacción de esta guía, este estudio (apoyado por CENAMAD) aún no es un recurso público.

8.3.4 Tipos de preservantes

En el mercado existe una amplia variedad de preservante diseñados para proteger la madera frente a distintos agentes de deterioro y se continúa innovando con nuevas soluciones cada vez más amigables con el medio ambiente. Cada uno de estos productos presenta características específicas, limitaciones, posibles riesgo para la salud, mayor o menor compatibilidad con adhesivos y conectores metálicos, y cierto impacto ambiental.

La NCh790 reconoce dos grandes clasificaciones de preservantes: (1) hidrosolubles y; (2) solubles en líquidos orgánicos (oleo solubles). De forma general, ambas clasificaciones tienen una limitación importante que vale la pena recalcar.

Los preservantes hidrosolubles no se recomiendan emplear en post-tratamiento de paneles de CLT mediante métodos de inmersión o presión, debido a las posibles grietas y fisuras que pueden generar los ciclos de hinchaón-merma (inundación-secado) del proceso. Por otra parte, para los preservante oleosolubles algunos documentos internacionales advierten de la emisión de compuestos orgánicos volátiles (COV), ya que se dice que suelen contener solventes orgánicos (como hidrocarburos o alcoholes) que ayudan a disolver los compuestos activos y que, durante el proceso de aplicación y secado, estos solventes se evaporan y emiten COVs (FPIInnovations, 2019b). Debido a esto, se recomienda que en las plantas de impregnación se identifiquen las posibles emisiones, emita una declaración ambiental de producto y que se adopten protocolos de seguridad y ventilación. En cuanto al proyectista, se recomienda consultar las sugerencias y medidas indicadas por el fabricante del preservante.

Independiente de la clasificación de preservante que se emplee, siempre es necesario verificar su compatibilidad con el adhesivo, procurando la adherencia y resistencia requerida por norma mediante ensayos.

También se debe comprobar su compatibilidad con los conectores metálicos, asegurando que los químicos de los preservantes no generen un ambiente corrosivo para el acero galvanizado u otros metales. Se recomienda el uso de conectores metálicos con sistemas de recubrimiento respaldados por reportes de evaluación que aseguran su protección y que mantengan su desempeño durante la vida útil de la estructura. Para evaluar la compatibilidad existen ciertos criterios estandarizados, como los definidos en el reporte AC257 (ICC-ES, 2023), que evalúa la resistencia a la corrosión en contacto con maderas tratadas con productos químicos, en distintas condiciones climáticas.

Además de la compatibilidad del preservante con los adhesivos y conectores del CLT, es importante también considerar el impacto ambiental y la potencial toxicidad de los preservantes. Pese a que los químicos utilizados en la industria de la madera de primera generación, como el creosoto, el pentaclorofenol y los óxidos de cobre, cromo y arsénico (CCA), han sido efectivos en la preservación de la madera, su impacto medioambiental negativo ha impulsado regulaciones más estrictas y un creciente uso de alternativas menos tóxicas. Las formulaciones más recientes incluyen preservantes como cobre alcalino cuaternario (ACQ), cobre-azoles (CA) o cobre micronizado (MCA) (Ayanleye et al., 2022), entre otras soluciones.

8.4 REQUERIMIENTOS NORMATIVOS

8.4.1 Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones

Tal como se ilustra en el diagrama de la Figura 8.1, para determinar si la durabilidad del componente que se está evaluando es adecuada, se necesita conocer la durabilidad natural del elemento y el nivel de riesgo al que estará sometido. Ambos conceptos están normados en Chile por las normativas

NCh789/1 y NCh819 respectivamente, siendo esta última la que también establece los requisitos mínimos para preservar la madera. Estas normas son de carácter obligatorio en Chile, al estar referenciadas en la OGUC, la cual indica en el punto 3 del artículo 5.6.8 del capítulo 6 que:

“(En toda edificación de madera) su durabilidad, de acuerdo con la NCh789/1, deberá corresponder a las 4 primeras categorías que se indican en la siguiente tabla, o bien a la quinta categoría, pero en este último caso deberá haber sido preservada conforme a la norma NCh819”

Artículo 5.6.8 – OGUC

A la fecha de publicación de esta guía, la tabla a la que hace referencia la OGUC es un extracto del Anexo informativo de la antigua **NCh789/1 de 1987**, la cual clasificaba el duramen de pino radiata frente a hongos de pudrición como “No durable”, siendo esta la quinta categoría y, por ende, debiendo ser preservada para cualquier uso estructural. Sin embargo, la actualización de la NCh789/1 en 2023 abre una nueva posibilidad.

8.4.2 NCh789/1 - Durabilidad de la madera

En el año 2023, la NCh789/1 se actualizó incluyendo un contenido mucho más detallado que su ver-

sión anterior, asemejándose más a la normativa europea EN 350. La nueva NCh789/1 proporciona una clasificación de la durabilidad de la madera y sus métodos de ensayo diferentes según el agente de biodeterioro y ya no solo declarada para hongos de pudrición, además de ligarla al nivel de riesgo. En esta se presentan clasificaciones y métodos de ensayo para hongos de pudrición (cláusula 5), insectos xilófagos (cláusula 6) y xilófagos marinos (cláusula 7). Del mismo modo, se actualizó el Anexo informativo con las clasificaciones de durabilidad del duramen de las especies, presentándose las durabilidades del pino radiata indicadas en la Tabla 8.2.

TABLA 8.2 – Clasificación de la durabilidad del duramen de pino radiata según NCh789/1:2023

Agente de biodeterioro	Categoría para nivel de riesgo definido en NCh819			
	R1	R2	R3	R4 – R5
Hongos de pudrición	M ¹⁾	S ²⁾	N	N
Insectos xilófagos	N	N	N	N

M: Muy durable

S: Semidurable

N: No durable

NOTA 1: Según NCh819, para el nivel de riesgo R1 no existen las condiciones para el desarrollo de hongos de pudrición.

NOTA 2: Si bien el duramen de pino radiata en R2 frente a hongos de pudrición se clasifica como “Semidurable”, en general esta especie se comercializa con albura, la cual siempre es “No durable”.

NOTA 3: Se destaca el rango de uso del CLT (ver sección 8.4.3).

Es importante notar que, en caso de no existir riesgo de insectos xilófagos y estar en un nivel de riesgo R1, el pino radiata puede ser clasificado como “Muy durable”, perteneciendo a las 4 primeras categorías indicadas en la OGUC y aceptándose utilizar sin preservación. Por otro lado, se debe tener precaución en presencia de un nivel de riesgo R2, ya que,

si bien se indica que el duramen es “Semidurable”, en general la madera de pino radiata utilizada para fabricar paneles de CLT provienen principalmente de madera lateral o semilateral, la cual presenta un alto porcentaje albura y muy puntualmente duramen. Por lo tanto, en estos casos, el pino radiata siempre se clasifica como “No durable”.

8.4.3 NCh819 – Madera preservada – Clasificación según riesgo de deterioro en servicio y muestreo

8.4.3.1 Nivel de riesgo

Los niveles de riesgo valoran el peligro de ataque de un elemento de madera y de los productos derivados de ésta, por los distintos organismos xilófagos, una vez puesto en servicio. Este riesgo es función, principalmente, del grado de humedad que pueda alcanzar el elemento durante su vida de servicio.

Debido a ser la humedad el factor determinante, existe cierta equivalencia con las **condiciones de servicio** de la NCh2148, así como también con las **clases de uso** de las normativas europeas, las *use category* de la normativa estadounidense y las *hazard classes* de la normativa australiana y neozelandesa. Para el CLT en Chile, es particularmente relevante la analogía con las clases de uso europeas (ver Tabla 8.3), debido a que la NCh3732 de los requisitos de fabricación de CLT (en anteproyecto a la fecha de publicación de esta guía) está basada en la EN 16351.

TABLA 8.3 – Equivalencia entre nivel de riesgo, condición de servicio y clase de uso (elaboración propia).

Nivel de riesgo NCh819:2019	Condición de servicio NCh2165:2023 Anexo F	Clase de uso UNE-EN335:2013
Riesgo 1 (R1)	Condición de servicio 1	Clase de uso 1
Riesgo 2 (R2)	Condición de servicio 2	Clase de uso 2
Riesgo 3 (R3)	-	Clase de uso 3.1
	Condición de servicio 3	Clase de uso 3.2
Riesgo 4 (R4)	-	Clase de uso 4
Riesgo 5 (R5)	-	-
Riesgo 6 (R6)	-	Clase de uso 5

NOTA: Equivalencia en base a las descripciones cuantitativas y cualitativas incluidas en cada norma.

La Figura 8.14 presenta un diagrama de flujo de apoyo para el usuario para la asignación del nivel de riesgo, según NCh819:2019.

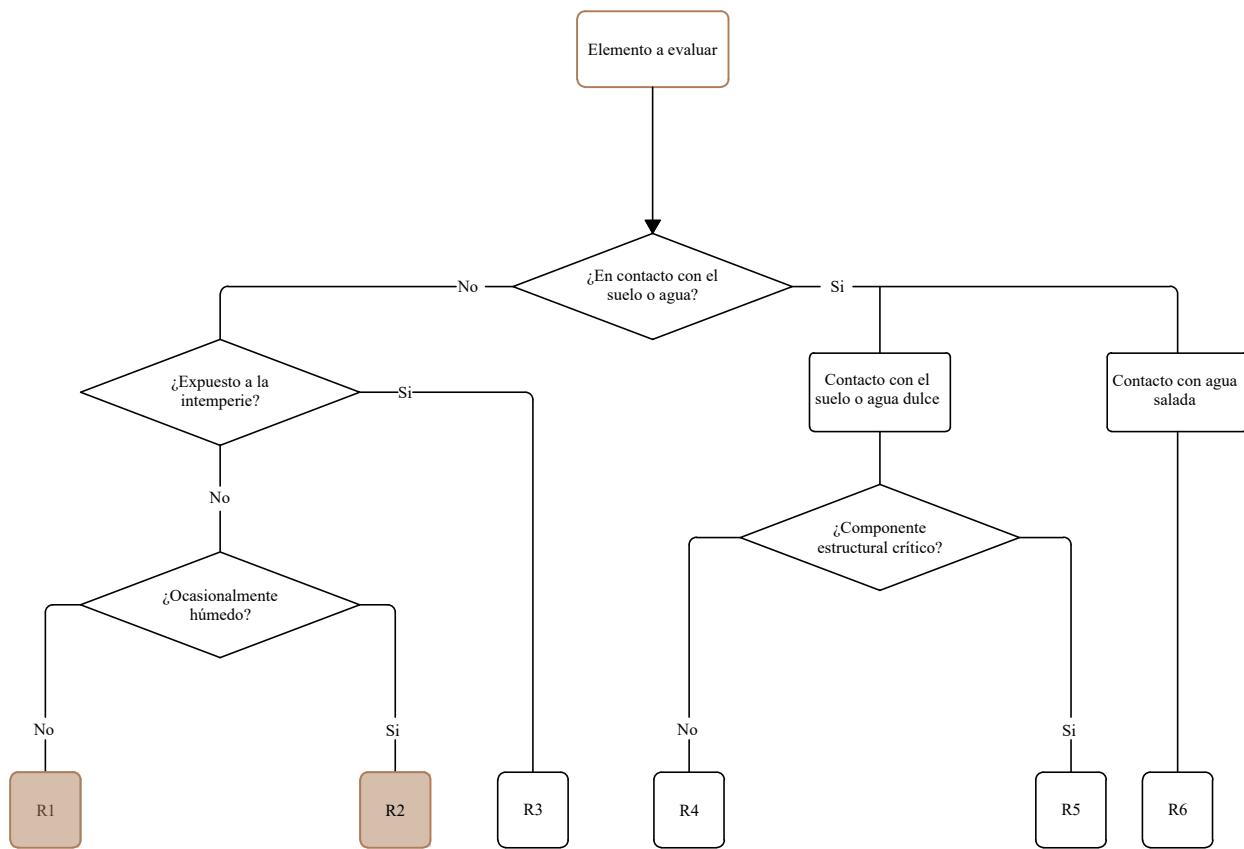


Figura 8.14 - Diagrama de flujo para la asignación de nivel de riesgo (Elaboración propia)

La normativa europea limitó el uso del CLT a las clases de uso 1 y 2, y tanto la normativa canadiense como la estadounidense⁴⁹ siguieron este ejemplo, especificando mantener los paneles en condiciones secas. En Chile, esto equivale a los niveles de riesgo (y condiciones de servicio) 1 y 2. La razón de limitar a estas condiciones y no permitir un nivel

de riesgo R3 – como lo está permitido para el MLE – es debido principalmente a la masividad del CLT y su dificultad para secarse. La Tabla 8.4 presenta valores cuantitativos, descripciones cualitativas y ejemplos de estos niveles de riesgo en que es aplicable el CLT.

49. Europeas: EN 16351:2021 y prEN1995-1-1:2023; canadiense: CSA 086-2019; estadounidense: NDS-2018.

TABLA 8.4 – Descripción de los niveles de riesgo R1, R2 y R3 (elaboración propia).

	Cuantitativa	Cualitativa	Ejemplos
Riesgo 1 (R1)	<u>Límite superior:</u> $H_R=65\%$ $H_s=12\%$ <u>Promedio anual:</u> $H_R=50\%$ $H_s=10\%$	Situación en que la madera o el material derivado de la madera se utiliza bajo cubierta, no expuesto a la intemperie ni a la humidificación. El ataque de hongos cromógenos o por hongos xilófagos es insignificante y siempre accidental. Es posible el ataque de insectos xilófagos incluyendo las termitas, aunque la frecuencia y la importancia del riesgo dependen de la ubicación geográfica.	Elementos dentro de recintos con ventilación natural o mecánica y/o calefacción esporádica, tal como son las viviendas y oficinas donde el aire interior se mantiene razonablemente seco, y la madera no está en contacto con humedad persistente.
Riesgo 2 (R2)	<u>Límite superior:</u> $H_R=85\%$ $H_s=20\%$ <u>Promedio anual:</u> $H_R=75\%$ $H_s=16\%$	Situación en la que la madera o material derivado de la madera se encuentra bajo cubierta y no expuesto a la intemperie (en particular a la lluvia horizontal) pero en la que puede estar sometido a una humidificación ocasional pero no persistente. En esta clase de uso puede producirse condensación superficial en la madera y materiales derivados de la madera. Se puede producir ataque por hongos cromógenos y por hongos xilófagos. Es posible el ataque por insectos xilófagos incluyendo las termitas, aunque la frecuencia y la importancia del riesgo dependen de la ubicación geográfica.	Elementos que están expuestos a un ambiente con alta humedad relativa pero que están protegidos del contacto directo con el agua y la exposición del sol, tal como cubiertas estructurales de piscinas, instalaciones agropecuarias ventiladas, bodegas con control de humedad, o elementos instalados próximos a cocinas y baños, siempre que tengan medidas de protección adecuadas.
Riesgo 3 (R3)	<u>Límite superior:</u> $H_R=95\%$ $H_s=24\%$ <u>Promedio anual:</u> $H_R=85\%$ $H_s=20\%$	Situación en la que la madera o material derivado de la madera está por encima de suelo y expuesto a la intemperie (en particular a la lluvia). Se puede producir ataque por hongos cromógenos y por hongos xilófagos. Es posible el ataque por insectos xilófagos incluyendo las termitas, aunque la frecuencia y la importancia del riesgo dependen de la ubicación geográfica	Elementos que están expuestos a la intemperie o al contacto directo con el agua líquida, sin protección física ni química y que no permiten la evacuación del agua ni están diseñados para secarse rápidamente, tal como son pisos de terrazas, pasarelas, puentes o pérgolas sin pendiente, ni drenaje ni medidas de protección directa.

H_R : humedad relativa del aire a 20 °C.

H_s : contenido de humedad de la madera en servicio.

NOTA 1: Basado en NCh819:2019, NCh2148:2013, prEN1995-1-1:2023 y UNE-EN335:2013

NOTA 2: Es importante diferenciar **intemperie** de **exterior**: intemperie hace referencia explícita a exposición a la lluvia y a la luz solar. Es posible una condición al exterior no expuesta a la intemperie.

Las medidas constructivas descritas en la sección 8.2 son estrategias para reducir el nivel de riesgo de un elemento, pudiendo eventualmente cambiar a un nivel de riesgo más bajo, por ejemplo, de una condición de R3 a R2, siempre en base a una justificación adecuada.

8.4.3.2 Preservación

Tal como se mencionó en la sección 8.4.1, cuando se emplea una especie de categoría “No durable”, debe ser preservada conforme a NCh819. Esta norma, además de establecer la clasificación de riesgo de deterioro, establece los requisitos de retención y penetración del preservante, y sus criterios de muestreo. Es importante diferenciar los términos preservante y protector: ambos son productos químicos que se aplican a la madera, pero el preservante tiene una función insecticida y fungicida, mientras que el protector es repelente al agua y resistente a radiación UV. La NCh819, y este capítulo, hacen referencia a los preservantes.

Actualmente, la NCh819 no contiene especificaciones sobre la preservación del CLT y tampoco existe normativa internacional que regule este tema. Debido a esto, mientras no exista documento normativo sobre la penetración y retención del preservantes en CLT, se recomienda seguir las especificaciones para MLE. Dicho esto, se debe cumplir la retención mínima de ingrediente activo según la Tabla 3 de NCh819, junto con una penetración de 100% en albara y 75 [mm] como mínimo en caso de duramen expuesto en la superficie.

La Tabla 8.5 presenta un resumen a modo de guía para el usuario de toda la sección 8.3, indicando los requisitos normativos y recomendaciones de tratamiento según el nivel de riesgo, agente de biodeterioro y clasificación del preservante, haciendo énfasis en cuando se puede post-tratar y cuando se debe pre-tratar el CLT.

TABLA 8.5 - Requisitos y recomendaciones de tratamiento según nivel de riesgo, agente de biodeterioro y clasificación del preservante (Elaboración propia).

Nivel de Riesgo	Agente de biodeterioro / Retención según Tabla 3, NCh819:2019	Categoría (Anexo A, NCh789/1)	Hidrosolubles ¹⁾					Oleo solubles			
			B ₂ O ₃ (SBX)	CA/B	CCA ²⁾	MCA	μCA-C	Creosota	LOSP (Permetrina)	LOSP (Permetrina + Azol)	LOSP (Permetrina + TBTN)
	Hongos de pudrición	M³⁾	-	-	Evitar	-	-	X	-	-	-
R1	Insectos xilófagos	N	P	P	Evitar	P	P	X	P	P	P
	Retención mínima [kg/m ³]	-	4,4	1,7		1,0	0,8		0,086	0,086 + 0,26	0,086 + 0,34
	Hongos de pudrición	S⁴⁾	P	P	Evitar	P	P	X	X	P	P
R2	Insectos xilófagos	N	P	P	Evitar	P	P	X	X	P	P
	Retención mínima [kg/m ³]	-	4,4	1,7	Evitar	1,0	0,8			0,086 + 0,26	0,086 + 0,34
R3 o más	-	-						No permitido para CLT⁵⁾			

LEYENDA

-	No es necesario preservar químicamente, pero tampoco se recomienda evitar. Queda a criterio del proyectista.
P	Es necesario preservar químicamente la madera.
Evitar	No se recomienda
X	No permitido

NOTA: Es importante diferenciar los términos **preservante** y **protector**: ambos son productos químicos que se aplican a la madera, pero el preservante tiene una función insecticida y fungicida, mientras que el protector es repelente al agua y resistente a radiación UV. La NCh819, y este capítulo, hacen referencia a los preservantes.

NOTAS

- 1) No se recomiendan preservantes hidrosolubles en post-tratamientos por inmersión o presión, debido a los ciclos de hinchazón-merma.
- 2) No se recomienda el uso de CCA, por su daño al medio ambiente y al ser humano.
- 3) Si no hay riesgo de termita subterránea, según NCh819, para el nivel de riesgo R1 no existen las condiciones para el desarrollo de hongos de pudrición, clasificándose el PR como Muy durable (M) - según FD P20-651 equivale a una durabilidad superior a 100 años.
- 4) Si bien el duramen de pino radiata en R2 frente a hongos de pudrición (y sin presencia de insectos xilófagos) se clasifica como “Semidurable”, en general esta especie se comercializa con albura, la cual siempre es “No durable”.
- 5) No se permite el uso de CLT en Nivel de Riesgo 3 o superior.
- 6) La lixiviación no es un factor determinante en el tratamiento del CLT con boro, dado que ocurre en niveles de riesgo R3 o superior, cuando existe una exposición a la humedad prolongada o persistente.

REFERENCIAS

- Ayanleye, S., Quin, F., Zhang, X., Lim, H., & Shmulsky, R. (2023). Preservatives penetration and retention in post-treated cross-laminated timber panels with different layup and thickness. *Journal of Building Engineering*, 67. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106009>
- Ayanleye, S., Udele, K., Nasir, V., Zhang, X., & Militz, H. (2022). Durability and protection of mass timber structures: A review. *Journal of Building Engineering*, 46. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103731>
- Bagheri, S., Alinejad, M., Ohno, K., Hasburgh, L., Arango, R., & Nejad, M. (2022). Improving durability of cross laminated timber (CLT) with borate treatment. *Journal of Wood Science*, 68(1). <https://doi.org/10.1186/s10086-022-02041-6>
- CIM UC. (2021a). *Guía de operación de edificaciones en madera*.
- CIM UC. (2021b). *Manual de Soluciones Constructivas*.
- CSA. (2019). *CSA S478:19 Durability in buildings*. www.csagroup.org/legal
- CSA 086:19 Engineering Design in Wood (2019).
- De, E., Mc-Manus, E., Riquelme, M., Hernán Martínez, ·, Besnier, R., & Ducaud, A. (n.d.). *Durabilidad Natural de Tratamientos Protectores Superficiales de la Madera Contra el Ataque de Hongos de Pudrición y Termitas*.
- Foliente, G. C., Leicester, R. H., Wang, C., Mackenzie, C., & Cole, I. (2002). Durability Design of Wood Construction. *Forest Products Journal*, 52(1), 10–19.
- FPInnovations. (2013). *CLT Handbook: cross laminated timber* (E. Karacabeyli & B. Douglas, Eds.). FPInnovations. www.awc.org
- FPInnovations. (2019). *Canadian CLT Handbook* (E. Karacabeyli & S. Gagnon, Eds.; Vols. 1, 2). FPInnovations.
- ICC-ES. (2023). *AC257 - ACCEPTANCE CRITERIA FOR CORROSION-RESISTANT FASTENERS AND EVALUATION OF CORROSION EFFECTS OF WOOD TREATMENTS*. www.icc-es.org
- Larsen, K. E., & Marstein, N. (2000). *Conservation of Historic Timber Structures An ecological approach* (2016th ed.).

Lim, H., Tripathi, S., & Tang, J. D. (2020). Bonding performance of adhesive systems for cross-laminated timber treated with micronized copper azole type C (MCA-C). *Construction and Building Materials*, 232. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117208>

NCh0789-1-2023 Durabilidad de La Madera (2023).

NCh0819-2019 Madera Preservada - Clasificación Según Riesgo de Deterioro En Servicio y Muestreo (2019). www.inn.cl

PrNCh3732-1-2025 Madera Contralaminada – Parte 1: Requisitos (2025).

Quin, F., Ayanleye, S., França, T. S. F. A., Shmulsky, R., & Lim, H. (2023). Bonding Performance of Preservative-Treated Cross-Laminated Timber (CLT) Posttreated with CU-Based Preservatives. *Forest Products Journal*, 73(4), 326–338. <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-23-00031>

Tascioglu, C., Goodell, B., & Lopez-Anido, R. (2003). Bond durability characterization of preservative treated wood and E-glass/phenolic composite interfaces. *Composites Science and Technology*, 63(7), 979–991. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00013-7](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00013-7)

Touza, M. (2013). *Guía de la Madera. Capítulo 2: Durabilidad.* www.confemadera.es

Wang, J. Y., Stirling, R., Fpinnovations, P. I. M., Taylor, A., Lloyd, J., Kirker, G., Lebow, S., Mankowski, M. E., Barnes, H. M., & Morrell, J. J. (2018). Durability of Mass Timber Structures: A Review of the Biological Risks. In *Wood and Fiber Science* (Vol. 50).



aislamiento acústico (Capítulo 7) y la durabilidad y preservación (Capítulo 8).

La interacción de estas distintas especialidades requiere una coordinación adecuada de todas las capas para lograr un comportamiento integral. Se debe evitar que las propiedades de un material se vean comprometidas por una mala interacción entre los componentes, como también se debe considerar el espacio o entorno donde se produce esta interacción, teniendo en cuenta sus condiciones específicas, como las climáticas, el uso de la edificación, el diseño arquitectónico, entre otros factores, y como estos influyen en la solución constructiva. En este sentido, una solución que funciona correctamente en un proyecto puede no ser efectivo en otro, por lo que cada solución debe adaptarse a las condiciones específicas de cada proyecto.

Este capítulo tiene como objetivo proporcionar un marco de referencia teórica para el diseño de soluciones constructivas en CLT, que sirve como base para que el usuario implemente estrategias adaptadas a las necesidades específicas de su proyecto. El criterio utilizado en el desarrollo de las soluciones se basa en responder a las menores y mayores exigencias establecidas en el marco regulatorio, aplicado a soluciones⁵⁰ con diferentes funciones, como Muro Perimetral (MP), Muro Divisorio (MD), Muro Interior (MI), Entrepiso (EP), Techumbre (TE). La Figura 9.1 ilustra cada tipo de solución constructiva. El objetivo de presentar soluciones para los menores y mayores requerimientos es facilitar la iteración del usuario para su solución particular, la cual es esperable que sea una solución “intermedia” en el rango presentado.

Cabe destacar que las soluciones constructivas propuestas son teóricas porque no han sido ensayadas ni validadas experimentalmente, por lo que se deben considerar únicamente como referenciales. Las soluciones ensayadas están condicionadas por los materiales y productos comerciales de marcas

CAPÍTULO 9

SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS TEÓRICAS

Las soluciones constructivas consisten en la selección e integración de un conjunto de materiales que, debidamente dimensionados y organizados, permiten satisfacer los diversos requerimientos de una edificación. Estas soluciones buscan responder tanto a las exigencias normativas como a las necesidades específicas de desempeño, abarcando especialidades como el diseño estructural (Capítulo 4), la resistencia al fuego (Capítulo 5), el diseño higrotérmico (Capítulo 6), el diseño de

50. Los Pisos Ventilados (PV) no se abordan en esta guía ya que, si bien es factible, esto es poco común, siendo la utilización de radiadores de hormigón lo más empleado, tanto por razones estructurales como por durabilidad. No obstante, los mismos principios de diseño frente a incendio, diseño higrotérmico y de durabilidad son extrapolables a los requerimientos de pisos ventilados.

específicas, por lo que tampoco cabe dentro del objetivo de este capítulo.

Finalmente, los conceptos y principios presentados pretenden servir como recomendaciones y en ningún caso son exhaustivos o normativos, a

no ser que se explice lo contrario. El diseño de cada solución para un proyecto en particular es responsabilidad del proyectista, quien debe ejercer su criterio justificado, pudiendo apoyarse en las soluciones y recomendaciones teóricas expuestas en el presente capítulo.

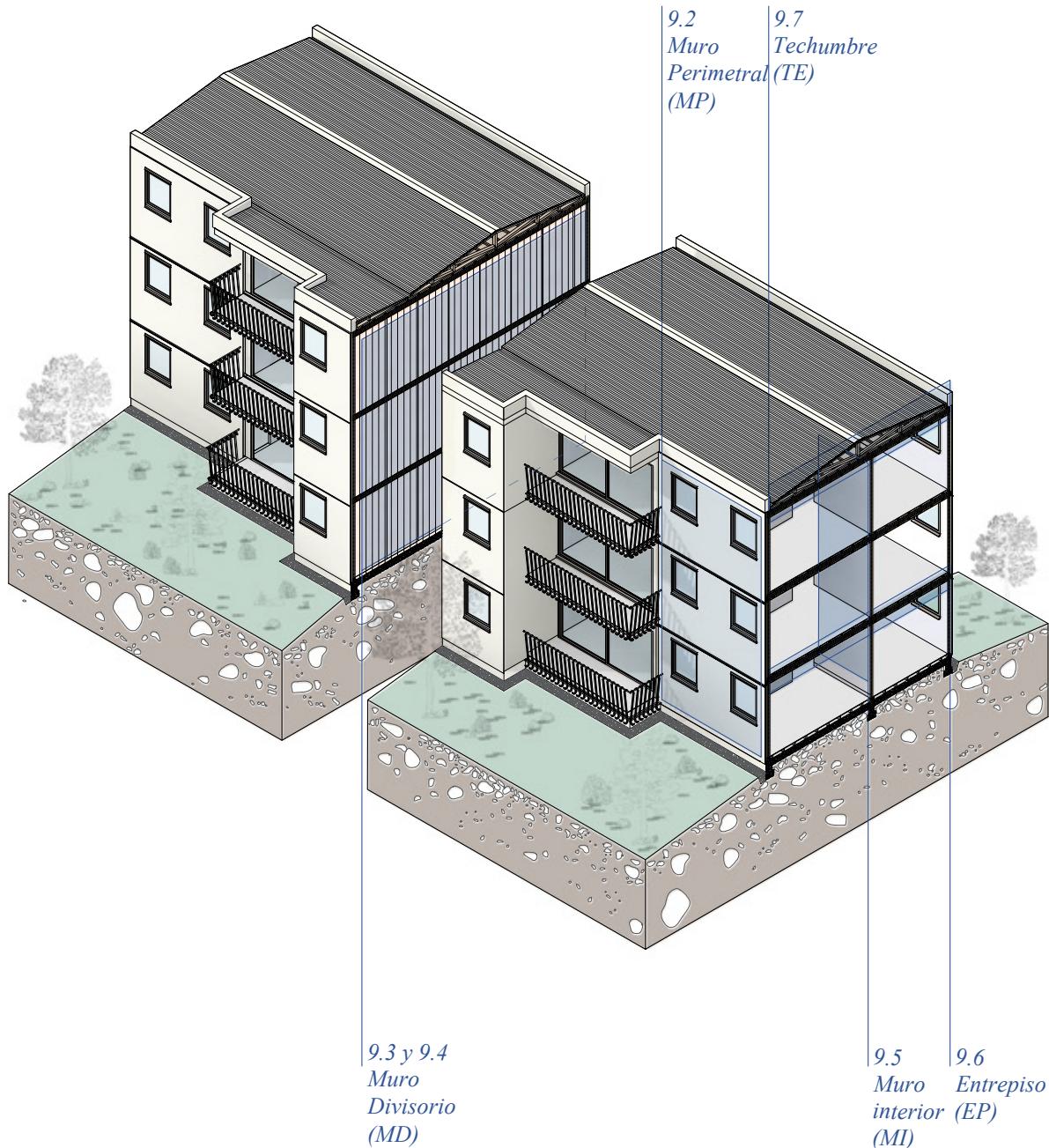


Figura 9.1 - Significado de las distintas soluciones constructivas.

9.1 CRITERIOS DE DISEÑO

Para cumplir las funciones estructurales, se considera como base que todos los paneles de CLT son de clase estructural combinada (CL-24/16c), siendo los muros (MP, MD y MI) y las techumbres (TE) paneles de 3 capas de 30 [mm], con un espesor total de 90 [mm]; mientras que losas (EP) son paneles de 5 capas de 30 [mm], con un espesor total de 150 [mm]. En ciertas situaciones, puede ser necesario incrementar el número de capas por requerimientos no estructurales, particularmente para las altas resistencias a fuego.

Para respaldar los requerimientos de fuego, se considera una de tres posibles opciones: (1) según cálculo del método de la sección efectiva presentado en el Capítulo 5; (2) según ensayos reales realizados en base a la NCh935/1; o (3) según una suposición teórica en base a soluciones constructivas del Listado Oficial.

La tercera opción se basa en que 6 soluciones constructivas del Listado Oficial de Comportamiento al Fuego de Elementos y Componentes de la Construcción (MINVU) cumplen F-120 utili-

zando 2 placas de yeso cartón RF de 15 [mm] por el lado expuesto al fuego y la estructura interna está conformada por elementos no resistentes al fuego⁵¹, teóricamente es esperable que un panel de CLT con 2 placas de yeso cartón RF de 15 [mm] cumpla también con F-120. Para respaldar y validar esta teoría se debe realizar el ensayo según NCh935-1.

Para verificar los requerimientos higrotérmicos, se realizan cálculos de transmitancia térmica y se utiliza la planilla de condensación de DITEC expuestos en el Capítulo 6.

Para respaldar los requerimientos acústicos, se considera una de dos opciones: (1) según ensayos reales realizados en base a la NCh2786; o (2) en base a las recomendaciones y buenas prácticas expuestas en el Capítulo 7.

Para los requisitos de durabilidad, se consideran dos casos: (1) el caso de menores requerimientos considera un nivel de riesgo 1 sin termitas, con lo que puede utilizarse un panel de CLT sin tratamiento de preservación; (2) el caso con mayores requerimientos considera un nivel de riesgo 2, por lo que es necesaria una preservación química.

51. Soluciones Constructivas del Listado Oficial: A.2.3.120.61; A.2.3.120.65; A.2.3.120.85; A.2.3.120.86; A.2.3.120.87; A.2.3.120.94

9.2 MURO PERIMETRAL (MP)

9.2.1 Solución constructiva con menores requerimientos

Un muro perimetral con bajos requerimientos se considera en un piso 1 o 2 con F-30, en zona térmica A, sin requerimientos acústicos y en nivel de riesgo 1 sin termitas.

Muro Perimetral (MP)

Solución constructiva menores requerimientos

Detalle de planta		Descripción				
Exterior		Interior	H G F E D C Revestimiento a elección B Estructura secundaria madera 41x90[mm] @400[mm] A Membrana según requerimientos O Madera Contralaminada (CLT) A' B' C' D' E' F' G' H'			
Leyenda	S _x Sección cálculo hidrotérmico C _x Capa cálculo hidrotérmico - - - Límites cálculo hidrotérmico					
Especie Pino Radiata	Espesor total solución 90 [mm]	Ancho total 400 [mm]	Espesor CLT 90 [mm]			
		L 1: e=30 [mm]	L 4: -			
		L 2: e=30 [mm]	L 5: -			
		L 3: e=30 [mm]	L 6: -			
			L 7: -			
			L 8: -			
			L 9: -			
Descripción geométrica de la solución constructiva						
Requerimiento	Fuego	Térmico	Condensación	Acústico	Durabilidad	
Condición	Tipo (5) En 1 o 2 pisos	Muros perimetrales Zona Térmica A	Aplica	Aéreo No aplica	Impacto No aplica	
Exigencia	F-30 Según OGUC	$U \leq 2,10$ [W/m ² K] Según decreto 15, 2024	$R_t \geq 0,48$ [m ² K/W]	80% Según NCh1973	$Rw \geq -$ $Lw \leq -$	Riesgo 2 y Sin termitas No aplica Según NCh789/1
Resultado	F-30 Según Cálculo	$U \leq 1,09$ [W/m ² K] Según Cálculo	$R_t \geq 0,92$ [m ² K/W]	Cumple Según Cálculo	No aplica No aplica	Sin preservar Según NCh819

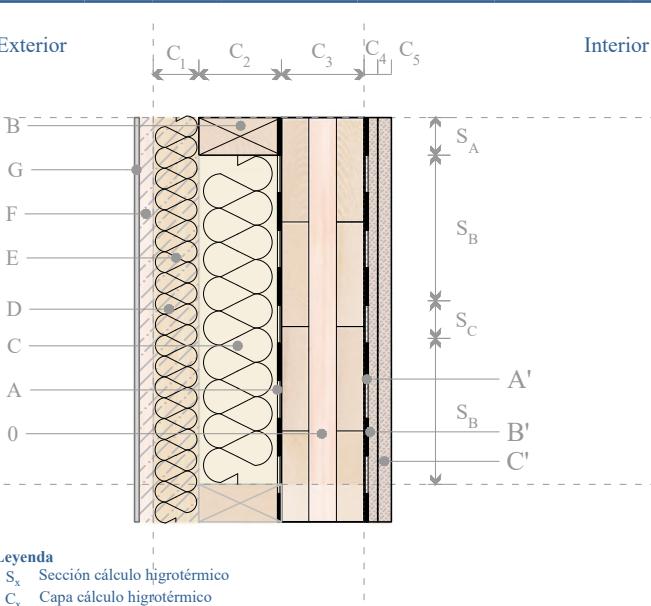
Notas:

- La sección 9.1 menciona los criterios de diseños utilizados para la elaboración de las soluciones constructivas.
- Esta solución constructiva, es un marco de referencia teórico, para la realización de una solución de un proyecto particular es responsabilidad del proyectista, quien debe ejercer su criterio justificado, pudiendo utilizar esta solución presentada como apoyo.
- Los autores, colaboradores y editores no asumen ninguna responsabilidad por cualquier daño directo o indirecto, lesión, perjuicio o pérdida que pueda producirse o sufrirse como resultado del uso, la confianza, la aplicación y/o la referencia a la información incluida en esta publicación.

9.2.2 Solución constructiva con mayores requerimientos

Un muro perimetral con altos requerimientos se considera en un piso 6 o más con F-120, en zona térmica H, sin requerimientos acústicos y en nivel de riesgo 2.

Muro Perimetral (MP) Solución constructiva mayores requerimientos

Detalle de planta			Descripción			
Exterior		Interior	H			
			G	Revestimiento a elección		
			F	Camara de aire ventilada (recomendación)		
			E	Aislación lana de vidrio 50[mm] (11[kg/m³])		
			D	Estructura secundaria 41x65[mm] @400[mm] perpendicular a B		
			C	Aislación lana de vidrio 90[mm] (11[kg/m³])		
			B	Estructura secundaria madera 41x90[mm] @400[mm]		
			A	Membrana según requerimientos		
			O	Madera Contralaminada (CLT)		
			A'	Polietileno 0,2[mm]		
			B'	Plancha yeso cartón RF 15[mm] (700 [kg/m³])		
			C'	Plancha yeso cartón RF 15[mm] (700 [kg/m³])		
			D'			
			E'			
			F'			
			G'			
			H'			
Leyenda	S _x Sección cálculo hidrotérmico C _x Capa cálculo hidrotérmico - - - Límites cálculo hidrotérmico					
Descripción geométrica de la solución constructiva						
Especie Radiata	Espesor total solución	Ancho total	Espesor CLT	L 1: e=30 [mm]	L 4: -	L 7: -
Pino				L 2: e=30 [mm]	L 5: -	L 8: -
Radiata	260 [mm]	400 [mm]	90 [mm]	L 3: e=30 [mm]	L 6: -	L 9: -
Requerimientos no estructurales de la solución constructiva						
Requerimiento	Fuego	Térmico	Condensación	Acústico		Durabilidad
Condición	Tipo (5) En 6 o más pisos	Muros perimetrales Zona Térmica H	Aplica	No aplica	No aplica	Riesgo 2 y Con termitas
Exigencia	F-120 Según OGUC	$U \leq 0,30$ [W/m²K] $R \geq 3,33$ [m²K/W] Según decreto 15, 2024	80% Según NCh1973	$Rw \geq -$	$Lw \leq -$	Aplica Según NCh789/1
Resultado	F-120 Según Cálculo	$U \leq 0,28$ [W/m²K] $R \geq 3,53$ [m²K/W] Según Cálculo	Cumple Según Cálculo	No aplica	No aplica	Preservar Según NCh819

Notas:

- La sección 9.1 menciona los criterios de diseños utilizados para la elaboración de las soluciones constructivas.
- Esta solución constructiva, es un marco de referencia teórico, para la realización de una solución de un proyecto particular es responsabilidad del proyectista, quien debe ejercer su criterio justificado, pudiendo utilizar esta solución presentada como apoyo.
- Los autores, colaboradores y editores no asumen ninguna responsabilidad por cualquier daño directo o indirecto, lesión, perjuicio o pérdida que pueda producirse o sufrirse como resultado del uso, la confianza, la aplicación y/o la referencia a la información incluida en esta publicación.

9.3 MURO DIVISORIO SIMPLE (MD)

9.3.1 Solución constructiva con menores requerimientos

Un muro divisorio con bajos requerimientos se considera en un piso 1 o 2 con F-60, sin requerimientos higrotérmicos, con requerimientos acústicos de transmisión aérea y en nivel de riesgo 1 sin termitas.

Muro divisorio (MD) - muro simple Solución constructiva menores requerimientos

Detalle de planta		Descripción
Exterior	Interior	H
		G
		F
		E
		D Plancha yeso cartón RF 15/mm]
		C Plancha yeso cartón ST 12.5/mm]
		B Estructura secundaria madera 41x41/mm] @400/mm]
		A Aislación lana de vidrio 40/mm] (11/kg/m³)]
		O Madera Contralaminada (CLT)
		A' Aislación lana de vidrio 40/mm] (11/kg/m³)]
		B' Estructura secundaria madera 41x41/mm] @400/mm]
		C' Plancha yeso cartón ST 12.5/mm]
		D' Plancha yeso cartón RF 15/mm]
		E'
		F'
		G'
		H'

Descripción geométrica de la solución constructiva

Especie Pino Radiata	Espesor total solución	Ancho total	Espesor CLT	L 1: e=30 [mm]	L 4: -	L 7: -
				L 2: e=30 [mm]	L 5: -	L 8: -
	227 [mm]	400 [mm]	90 [mm]	L 3: e=30 [mm]	L 6: -	L 9: -

Requerimientos no estructurales de la solución constructiva

Requerimiento	Fuego	Térmico	Condensación	Acústico		Durabilidad	
				Aéreo	Impacto		
Condición	Tipo (4) En 1 o 2 pisos	No aplica	No aplica	Aplica +C	No aplica	Riesgo 1 y Sin termitas	
Exigencia	F-60 Según OGUC	$U \leq -$ [W/m²K]	$R_i \geq -$ [m²K/W]	-	$Rw \geq 45 dB(A)$ Según OGUC	$Lw \leq -$	No aplica Según NCh789/1
Resultado	F-60 Según Cálculo	$U \leq -$ [W/m²K]	$R_i \geq -$ [m²K/W]	-	49 dB(A) Ensayo según NCh2786	No Aplica	Sin preservar Según NCh819

Notas:

- La sección 9.1 menciona los criterios de diseños utilizados para la elaboración de las soluciones constructivas.
- Esta solución constructiva, es un marco de referencia teórico, para la realización de una solución de un proyecto particular es responsabilidad del proyectista, quien debe ejercer su criterio justificado, pudiendo utilizar esta solución presentada como apoyo.
- Los autores, colaboradores y editores no asumen ninguna responsabilidad por cualquier daño directo o indirecto, lesión, perjuicio o pérdida que pueda producirse o sufrirse como resultado del uso, la confianza, la aplicación y/o la referencia a la información incluida en esta publicación.

9.3.2 Solución constructiva con mayores requerimientos

Un muro divisorio con altos requerimientos se considera en un piso 6 o más con F-120, sin requerimientos higrotérmicos, con requerimientos acústicos de transmisión aérea y en nivel de riesgo 2.

Muro divisorio (MD) - muro simple Solución constructiva mayores requerimientos

Detalle de planta			Descripción				
Exterior			Interior				
			<p>H _____</p> <p>G _____</p> <p>F _____</p> <p>E _____</p> <p>D Plancha yeso cartón RF 15[mm]</p> <p>C Plancha yeso cartón RF 15[mm]</p> <p>B Estructura secundaria madera 41x41[mm] @400[mm]</p> <p>A Aislación lana mineral, colchoneta libre 40[mm] (40[kg/m³])</p> <p>O Madera Contralaminada (CLT)</p> <p>A' Aislación lana mineral, colchoneta libre 40[mm] (40[kg/m³])</p> <p>B' Estructura secundaria madera 41x41[mm] @400[mm]</p> <p>C' Plancha yeso cartón RF 15[mm]</p> <p>D' Plancha yeso cartón RF 15[mm]</p> <p>E' _____</p> <p>F' _____</p> <p>G' _____</p> <p>H' _____</p>				
Descripción geométrica de la solución constructiva							
Especie Pino Radiata	Espesor total solución	Ancho total	Espesor CLT	L 1: e=30 [mm] L 2: e=30 [mm] L 3: e=30 [mm]	L 4: - L 5: - L 6: -	L 7: - L 8: - L 9: -	
	223 [mm]	400 [mm]	90 [mm]				
Requerimientos no estructurales de la solución constructiva							
Requerimiento	Fuego		Térmico		Acústico		Durabilidad
					Aéreo	Impacto	
Condición	Tipo (4) En 6 o más pisos		No aplica		No aplica	Aplica	No aplica Riesgo 2 y Con termitas
Exigencia	F-120 Según OGUC		$U \leq -$ [W/m²K]	$R_t \geq -$ [m²K/W]	-	$Rw \geq 48 dB(A)$ Según NCh352/1	$Lw \leq -$ Aplica Según NCh789/1
Resultado	F-120 Según Solución Constructiva		$U \leq -$ [W/m²K]	$R_t \geq -$ [m²K/W]	No aplica	Sin Ensayo No Aplica	Preservar Según NCh819

Notas:

- La sección 9.1 menciona los criterios de diseños utilizados para la elaboración de las soluciones constructivas.
- Esta solución constructiva, es un marco de referencia teórico, para la realización de una solución de un proyecto particular es responsabilidad del proyectista, quien debe ejercer su criterio justificado, pudiendo utilizar esta solución presentada como apoyo.
- Los autores, colaboradores y editores no asumen ninguna responsabilidad por cualquier daño directo o indirecto, lesión, perjuicio o pérdida que pueda producirse o sufrirse como resultado del uso, la confianza, la aplicación y/o la referencia a la información incluida en esta publicación.

9.4 MURO DIVISORIO DOBLE (MD)

9.4.1 Solución constructiva con menores requerimientos

Un muro divisorio con bajos requerimientos se considera en un piso 1 o 2 con F-60, sin requerimientos higrotérmicos, con requerimientos acústicos de transmisión aérea y en nivel de riesgo 1 sin termitas.

Muro divisorio (MD) - muro doble Solución constructiva menores requerimientos

Detalle de planta		Descripción	
Exterior		H	
		G	
		F	
		E	
		D	
		C	
		B	
		A Madera Contralaminada (CLT)	
		0 Aislación lana mineral, colchoneta libre 50 [mm] (40 [kg/m³])	
		A' Madera Contralaminada (CLT)	
		B'	
		C'	
		D'	
		E'	
		F'	
		G'	
		H'	

Descripción geométrica de la solución constructiva

Especie Pino Radiata	Espesor total solución	Ancho total	Espesor CLT	L 1: e=30 [mm]	L 4: -	L 7: -
				L 2: e=30 [mm]	L 5: -	L 8: -
	230 [mm]	-	90 [mm]	L 3: e=30 [mm]	L 6: -	L 9: -

Requerimientos no estructurales de la solución constructiva

Requerimiento	Fuego	Térmico	Condensación	Acústico		Durabilidad
				Aéreo	Impacto	
Condición	Tipo (4) En 1 o 2 pisos	No aplica	No aplica	Aplica +C	No aplica	Riesgo 1 y Sin termitas
Exigencia	F-60 Según OGUC	$U \leq -$ [W/m²K]	$R_i \geq -$ [m²K/W]	-	$Rw \geq 45 dB(A)$ Según OGUC	$Lw \leq -$ No aplica Según NCh789/1
Resultado	F-60 Según Cálculo	$U \leq -$ [W/m²K]	$R_i \geq -$ [m²K/W]	No aplica	46 dB(A) Ensayo N° 349 - CPIA	Sin preservar Según NCh819

Notas:

- La sección 9.1 menciona los criterios de diseños utilizados para la elaboración de las soluciones constructivas.
- Esta solución constructiva, es un marco de referencia teórico, para la realización de una solución de un proyecto particular es responsabilidad del proyectista, quien debe ejercer su criterio justificado, pudiendo utilizar esta solución presentada como apoyo.
- Los autores, colaboradores y editores no asumen ninguna responsabilidad por cualquier daño directo o indirecto, lesión, perjuicio o pérdida que pueda producirse o sufrirse como resultado del uso, la confianza, la aplicación y/o la referencia a la información incluida en esta publicación.

9.4.2 Solución constructiva con mayores requerimientos

Un muro divisorio con altos requerimientos se considera en un piso 6 o más con F-120, sin requerimientos higrotérmicos, con requerimientos acústicos de transmisión aérea y en nivel de riesgo 2.

Muro divisorio (MD) - muro doble Solución constructiva mayores requerimientos

Detalle de planta			Descripción		
Exterior		Interior	H		
			G		
			F		
			E		
			D		
			C Plancha yeso cartón RF 15[mm]		
			B Plancha yeso cartón RF 15[mm]		
			A Madera Contralaminada (CLT)		
	0		O Aislación lana mineral, colchoneta libre 50[mm] (40[kg/m³])		
			A' Madera Contralaminada (CLT)		
			B' Plancha yeso cartón RF 15[mm]		
			C' Plancha yeso cartón RF 15[mm]		
			D'		
			E'		
			F'		
			G'		
			H'		
Descripción geométrica de la solución constructiva					
Especie Pino Radiata	Espesor total solución	Ancho total	Espesor CLT	L 1: e=30 [mm] L 2: e=30 [mm] L 3: e=30 [mm]	L 4: - L 5: - L 6: - L 7: - L 8: - L 9: -
	290 [mm]	-	90 [mm]		
Requerimientos no estructurales de la solución constructiva					
Requerimiento	Fuego	Térmico	Condensación	Acústico	Durabilidad
Condición	Tipo (4) En 6 o más pisos	No aplica	No aplica	Aplica	No aplica Riesgo 2 y Con termitas
Exigencia	F-120 Según OGUC	$U \leq -$ [W/m²K]	$R_t \geq -$ [m²K/W]	$Rw \geq 48 dB(A)$ Según NCh352/1	$Lw \leq -$ Aplica Según NCh789/1
Resultado	F-120 Según Solución Constructiva	$U \leq -$ [W/m²K]	$R_t \geq -$ [m²K/W]	No aplica Sin ensayo No Aplica	Preservar Según NCh819

Notas:

- La sección 9.1 menciona los criterios de diseños utilizados para la elaboración de las soluciones constructivas.
- Esta solución constructiva, es un marco de referencia teórico, para la realización de una solución de un proyecto particular es responsabilidad del proyectista, quien debe ejercer su criterio justificado, pudiendo utilizar esta solución presentada como apoyo.
- Los autores, colaboradores y editores no asumen ninguna responsabilidad por cualquier daño directo o indirecto, lesión, perjuicio o pérdida que pueda producirse o sufrirse como resultado del uso, la confianza, la aplicación y/o la referencia a la información incluida en esta publicación.

9.5 MURO INTERIOR (MI)

9.5.1 Solución constructiva con menores requerimientos

Un muro interior con bajos requerimientos se considera en un piso 1 o 2 con F-30, sin requerimientos higrotérmicos ni acústicos y en nivel de riesgo 1 sin termitas.

Muro interior (MI)

Solución constructiva menores requerimientos

Detalle de planta			Descripción			
Exterior		Interior	H			
			G			
			F			
			E			
			D			
			C			
			B			
			A			
	0		0 Madera Contralaminada (CLT)			
			A'			
			B'			
			C'			
			D'			
			E'			
			F'			
			G'			
			H'			
Descripción geométrica de la solución constructiva						
Especie Radiata	Espesor total solución	Ancho total	Espesor CLT	L 1: e=30 [mm]	L 7: -	
Pino				L 2: e=30 [mm]	L 8: -	
Radiata	223 [mm]	400 [mm]	90 [mm]	L 3: e=30 [mm]	L 9: -	
Requerimientos no estructurales de la solución constructiva						
Requerimiento	Fuego	Térmico	Condensación	Acústico		
				Aéreo	Impacto	
Condición	Tipo (5) En 1 o 2 pisos	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	Riesgo 1 y Sin termitas
Exigencia	F-30 Según OGUC	$U \leq -$ [W/m ² K]	$R_i \geq -$ [m ² K/W]	-	$Rw \geq -$	$Lw \leq -$ No aplica Según NCh789/1
Resultado	F-30 Ensayo según NCh 935/1	$U \leq -$ [W/m ² K]	$R_i \geq -$ [m ² K/W]	No aplica	No aplica	No aplica Sin preservar Según NCh819

Notas:

- La sección 9.1 menciona los criterios de diseños utilizados para la elaboración de las soluciones constructivas.
- Esta solución constructiva, es un marco de referencia teórico, para la realización de una solución de un proyecto particular es responsabilidad del proyectista, quien debe ejercer su criterio justificado, pudiendo utilizar esta solución presentada como apoyo.
- Los autores, colaboradores y editores no asumen ninguna responsabilidad por cualquier daño directo o indirecto, lesión, perjuicio o pérdida que pueda producirse o sufrirse como resultado del uso, la confianza, la aplicación y/o la referencia a la información incluida en esta publicación.

9.5.2 Solución constructiva con mayores requerimientos

Un muro interior con altos requerimientos se considera en un piso 6 o más con F-120, sin requerimientos higrotérmicos ni acústicos y en nivel de riesgo 2.

Muro interior (MI)

Solución constructiva mayores requerimientos

Detalle de planta		Descripción				
Exterior	Interior	H				
		G				
		F				
		E				
		D				
		C				
		B Plancha yeso cartón RF 15[mm]				
		A Plancha yeso cartón RF 15[mm]				
		O Madera Contralaminada (CLT)				
		A' Plancha yeso cartón RF 15[mm]				
		B' Plancha yeso cartón RF 15[mm]				
		C'				
		D'				
		E'				
		F'				
		G'				
		H'				
Descripción geométrica de la solución constructiva						
Especie Pino Radiata	Espesor total solución	Ancho total	Espesor CLT	L 1: e=30 [mm] L 2: e=30 [mm] L 3: e=30 [mm]	L 4: - L 5: - No aplica L 6: -	L 7: - L 8: - L 9: -
	223 [mm]	400 [mm]	90 [mm]			
Requerimientos no estructurales de la solución constructiva						
Requerimiento	Fuego	Térmico	Condensación	Acústico	Durabilidad	
Condición	Tipo (5) En 6 o más pisos	No aplica	No aplica	No aplica Aéreo	No aplica Impacto	Riesgo 2 y Con termitas
Exigencia	F-120 Según OGUC	$U \leq -$ [W/m ² K]	$R_t \geq -$ [m ² K/W]	-	$Rw \geq -$ $Lw \leq -$	Aplica Según NCh789/1
Resultado	F-120 Según Solución Constructiva	$U \leq -$ [W/m ² K]	$R_t \geq -$ [m ² K/W]	No aplica	No aplica No aplica	Preservar Según NCh819

Notas:

- La sección 9.1 menciona los criterios de diseños utilizados para la elaboración de las soluciones constructivas.
- Esta solución constructiva, es un marco de referencia teórico, para la realización de una solución de un proyecto particular es responsabilidad del proyectista, quien debe ejercer su criterio justificado, pudiendo utilizar esta solución presentada como apoyo.
- Los autores, colaboradores y editores no asumen ninguna responsabilidad por cualquier daño directo o indirecto, lesión, perjuicio o pérdida que pueda producirse o sufrirse como resultado del uso, la confianza, la aplicación y/o la referencia a la información incluida en esta publicación.

9.6 ENTREPISO (EP)

9.6.1 Solución constructiva con menores requerimientos

Un entrepiso con bajos requerimientos se considera en un piso 1 o 2 con F-30, sin requerimientos higro-termicos, con requerimientos acústicos de transmisión aérea e impacto y en nivel de riesgo 1 sin termitas.

Entrepiso (EP)

Solución constructiva menores requerimientos

Detalle de planta			Descripción				
H							
G							
F							
E							
D	Piso de terminación a elección						
C	2x Panel de fibrocemento para entrepiso traslapado 20 [mm] c/u (90 [kg/m³])						
B	Panel de lana de vidrio de alta densidad 25 [mm] (90 [kg/m³])						
A	Membrana acústica (polietileno reticulado o similar) alta densidad 5 [mm] (27 [kg/m³])						
O	Madera Contralaminada (CLT)						
A'							
B'							
C'							
D'							
E'							
F'							
G'							
H'							
Descripción geométrica de la solución constructiva							
Especie Pino Radiata	Espesor total solución	Ancho total	Espesor CLT	L 1: e=30 [mm]	L 4: e=30 [mm]	L 7: -	
				L 2: e=30 [mm]	L 5: e=30 [mm]	L 8: -	
	220 [mm]	400 [mm]	150 [mm]	L 3: e=30 [mm]	L 6: -	L 9: -	
Requerimientos no estructurales de la solución constructiva							
Requerimiento	Fuego	Térmico	Condensación	Acústico		Durabilidad	
				Aéreo	Impacto		
Condición	Tipo (8) En 1 o 2 pisos	No aplica	No aplica	Aplica +C	Aplica	Riesgo 1 y Sin termitas	
Exigencia	F-30 Según OGUC	$U \leq -$ [W/m²K]	$R_i \geq -$ [m²K/W]	-	$Rw \geq 45 dB(A)$ Según OGUC	$Lw \geq 75 dB$ Según OGUC	No aplica Según NCh789/1
Resultado	F-60 Según Cálculo	$U \leq -$ [W/m²K]	$R_i \geq -$ [m²K/W]	No aplica	Sin ensayo	Sin ensayo	Sin preservar Según NCh819

Notas:

- La sección 9.1 menciona los criterios de diseños utilizados para la elaboración de las soluciones constructivas.
- Esta solución constructiva, es un marco de referencia teórico, para la realización de una solución de un proyecto particular es responsabilidad del proyectista, quien debe ejercer su criterio justificado, pudiendo utilizar esta solución presentada como apoyo.
- Los autores, colaboradores y editores no asumen ninguna responsabilidad por cualquier daño directo o indirecto, lesión, perjuicio o pérdida que pueda producirse o sufrirse como resultado del uso, la confianza, la aplicación y/o la referencia a la información incluida en esta publicación.

9.6.2 Solución constructiva con mayores requerimientos

Un entrepiso con altos requerimientos se considera en un piso 6 o más con F-120, sin requerimientos higrotérmicos, con requerimientos acústicos de transmisión aérea e impacto y en nivel de riesgo 2.

Entrepiso (EP)

Solución constructiva mayores requerimientos

Detalle de planta	Descripción					
	H _____ G _____ F _____ E _____ D Piso de terminación a elección C 2x Panel de fibrocemento para entrepiso traslapado 20[mm] c/u (90[kg/m³]) B Panel de lana de vidrio de alta densidad 25[mm] (90[kg/m³]) A Membrana acústica (polietileno reticulado o similar) alta densidad 5[mm] (27[kg/m³]) O Madera Contralaminada (CLT) A' Aislación lana de vidrio 40[mm] (11[kg/m³]) B' Estructura secundaria madera 41x41[mm] @400[mm] C' Plancha yeso cartón RF 15[mm] D' Plancha yeso cartón RF 15[mm] E' F' G' H'					
Descripción geométrica de la solución constructiva						
Especie Pino Radiata Espesor total solución: 331 [mm] Ancho total: 400 [mm]	L 1: e=30 [mm] L 2: e=30 [mm] L 3: e=30 [mm]	L 4: e=30 [mm] L 5: e=30 [mm] L 6: e=30 [mm]	L 7: e=30 [mm] L 8: - L 9: -			
Requerimientos no estructurales de la solución constructiva						
Requerimiento	Fuego	Térmico	Condensación	Acústico		Durabilidad
Condición	Tipo (8) En 6 o más pisos	No aplica	No aplica	Aplica	Aplica	Riesgo 2 y Con termitas
Exigencia	F-120 Según OGUC	$U \leq -$ [W/m²K]	$R_t \geq -$ [m²K/W]	-	$Rw \geq 50dB(A)$ Según NCh352/1	$Lw \geq 75 dB(A)$ Según OGUC
Resultado	F-120 Según Cálculo	$U \leq -$ [W/m²K]	$R_t \geq -$ [m²K/W]	No aplica	Sin ensayo	Preservar Según NCh819

Notas:

- La sección 9.1 menciona los criterios de diseños utilizados para la elaboración de las soluciones constructivas.
- Esta solución constructiva, es un marco de referencia teórico, para la realización de una solución de un proyecto particular es responsabilidad del proyectista, quien debe ejercer su criterio justificado, pudiendo utilizar esta solución presentada como apoyo.
- Los autores, colaboradores y editores no asumen ninguna responsabilidad por cualquier daño directo o indirecto, lesión, perjuicio o pérdida que pueda producirse o sufrirse como resultado del uso, la confianza, la aplicación y/o la referencia a la información incluida en esta publicación.

9.7 TECHUMBRE (TE)

9.7.1 Solución constructiva con menores requerimientos

Una techumbre con bajos requerimientos se considera en un piso 1 o 2 con F-15, en zona térmica A, sin requerimientos acústicos y en nivel de riesgo 1 sin termitas.

Techumbre (TE) Solución constructiva menores requerimientos

Detalle de planta		Descripción	
 Leyenda: S _x Sección cálculo higrotérmico C _x Capa cálculo higrotérmico - - - Límites cálculo higrotérmico	Exterior Interior	H G Revestimiento genérico F Estructura soporte revestimiento 19x41[mm] @400[mm] E Cámara de aire ventilada (recomendación) D Fieltro M-110-40 0,27[mm] C Plancha OSB 9,5[mm] (648/kg/m ³) B Estructura secundaria madera 41x41[mm] @400[mm] A Cámara de aire no ventilada 41[mm] O Madera Contralaminada (CLT)	H'
A'			
B'			
C'			
D'			
E'			
F'			
G'			

Descripción geométrica de la solución constructiva

Especie Pino Radiata	Espesor total solución	Ancho total	Espesor CLT	L 1: e=30 [mm]	L 4: -	L 7: -
				L 2: e=30 [mm]	L 5: -	L 8: -
	140,5 [mm]	400 [mm]	90 [mm]	L 3: e=30 [mm]	L 6: -	L 9: -

Requerimientos no estructurales de la solución constructiva

Requerimiento	Fuego	Térmico	Condensación	Acústico		Durabilidad
				Aéreo	Impacto	
Condición	Tipo (9) En 1 o 2 pisos	Techumbre Zona Térmica A	No aplica	No aplica	No aplica	Riesgo 1 y Sin termitas
Exigencia	F-15 Según OGUC	$U \leq 0,84$ [W/m ² K] Según decreto 15, 2024	$R_t \geq 1,19$ [m ² K/W] Según NCh1973	80%	$Rw \geq -$	$Lw \leq -$ No aplica Según NCh789/1
Resultado	F-30 Según Cálculo	$U \leq 0,80$ [W/m ² K] Según Cálculo	$R_t \geq 1,19$ [m ² K/W] Según Cálculo	Cumple Según Cálculo	No aplica	No aplica Sin preservar Según NCh819

Notas:

- La sección 9.1 menciona los criterios de diseños utilizados para la elaboración de las soluciones constructivas.
- Esta solución constructiva, es un marco de referencia teórico, para la realización de una solución de un proyecto particular es responsabilidad del proyectista, quien debe ejercer su criterio justificado, pudiendo utilizar esta solución presentada como apoyo.
- Los autores, colaboradores y editores no asumen ninguna responsabilidad por cualquier daño directo o indirecto, lesión, perjuicio o pérdida que pueda producirse o sufrirse como resultado del uso, la confianza, la aplicación y/o la referencia a la información incluida en esta publicación.

9.7.2 Solución constructiva con mayores requerimientos

Una techumbre con altos requerimientos se considera en un piso 6 o más con F-60, en zona térmica H, sin requerimientos acústicos y en nivel de riesgo 2.

Techumbre (TE) Solución constructiva mayores requerimientos

Detalle de planta		Descripción
<p>Leyenda</p> <ul style="list-style-type: none"> S_x Sección cálculo hidrotérmico C_x Capa cálculo hidrotérmico - - - Límites cálculo hidrotérmico 	<p>K Revestimiento genérico</p> <p>J Fielto M-110-40 0,27 [mm]</p> <p>I Plancha OSB 11,1 [mm] (648 [kg/m³])</p> <p>H Cámara de aire no ventilada 30 [mm]</p> <p>G Aislación lana de vidrio 60 [mm] (11 [kg/m³])</p> <p>F Estructura secundaria madera 41x90 [mm] @400 [mm] perpendicular a B</p> <p>E Plancha OSB 11,1 [mm] (648 [kg/m³])</p> <p>D Cámara de aire no ventilada 30 [mm]</p> <p>C Aislación lana de vidrio 60 [mm] (11 [kg/m³])</p> <p>B Estructura secundaria madera 41x90 [mm] @400 [mm]</p> <p>A 2 x Polietileno 0,2 [mm]</p> <p>0 Madera Contralaminada (CLT)</p> <p>A'</p> <p>B'</p> <p>C'</p> <p>D'</p> <p>E'</p>	

Descripción geométrica de la solución constructiva

Especie Pino Radiata	Espesor total solución	Ancho total	Espesor CLT	L 1: e=30 [mm]	L 4: e=30 [mm]	L 7: -
				L 2: e=30 [mm]	L 5: e=30 [mm]	L 8: -
	352,2 [mm]	400 [mm]	150 [mm]	L 3: e=30 [mm]	L 6: -	L 9: -

Requerimientos no estructurales de la solución constructiva

Requerimiento	Fuego	Térmico	Condensación	Acústico		Durabilidad
				Aéreo	Impacto	
Condición	Tipo (9) En 6 o más pisos	Techumbre Zona Térmica H	No aplica	No aplica	No aplica	Riesgo 2 y Con termitas
Exigencia	F-60 Según OGUC	$U \leq 0,25$ [W/m²K] Según decreto 15, 2024	$R \geq 4,00$ [m²K/W]	80% Según NCh1973	$Rw \geq -$	$Lw \leq -$ Aplica Según NCh789/1
Resultado	F-60 Según Cálculo	$U \leq 0,22$ [W/m²K] Según Cálculo	$R \geq 4,57$ [m²K/W]	Cumple Según Cálculo	No aplica	No aplica Preservar Según NCh819

Notas:

- La sección 9.1 menciona los criterios de diseños utilizados para la elaboración de las soluciones constructivas.
- Esta solución constructiva, es un marco de referencia teórico, para la realización de una solución de un proyecto particular es responsabilidad del proyectista, quien debe ejercer su criterio justificado, pudiendo utilizar esta solución presentada como apoyo.
- Los autores, colaboradores y editores no asumen ninguna responsabilidad por cualquier daño directo o indirecto, lesión, perjuicio o pérdida que pueda producirse o sufrirse como resultado del uso, la confianza, la aplicación y/o la referencia a la información incluida en esta publicación.

REFERENCIAS

MINVU. (2024). *ED16-2024 Listado Oficial de Comportamiento al Fuego de Elementos y Componentes de la Construcción del Ministerio de Vivienda y Urbanismo.*

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Edificios de madera masiva más altos del mundo al 2024	12
Figura 1.2 - El CLT y su configuración bidireccional	14
Figura 1.3 - Componente de capas (<i>the layer structure</i>)	15
Figura 3.1 – Esquema de tipología poste-viga	27
Figura 3.2 - Ejemplo de tipología poste-viga	28
Figura 3.3 – Esquema de tipología poste-plataforma	29
Figura 3.4 – Montaje de edificio Brock Commons, ejemplo de tipología poste-plataforma	30
Figura 3.5 – Esquema de tipología marco arriostrado	31
Figura 3.6 – Edificio Mjøstårnet, ejemplo tipología marco arriostrado	32
Figura 3.7 –Esquema de tipología paneles de madera masiva	33
Figura 3.10 – Montaje de edificio Stadthaus, ejemplo de tipología paneles de madera masiva.....	34
Figura 3.8 – Variante paneles de CLT en plataforma.....	34
Figura 3.9 – Variante paneles de CLT en balloon	34
Figura 3.11 – Esquema de tipología estructura laminar	35
Figura 3.12 – Kaeng Krachan Elephant Park, ejemplo de tipología estructura laminar	36
Figura 4.1 - Definiciones de partes de un panel de CLT (basado en UNE – EN 16351:2021).....	43
Figura 4.2 - Ejemplo de determinación de las distancias z_x en la cara menor x	45
Figura 4.3 - Ejemplo de propiedades de las capas para la cara menor x (eje fuerte).....	48
Figura 4.4 - Ejemplo de propiedades de las capas para la cara menor y (eje débil).....	49
Figura 4.5 - Tensiones debidas a solicitudes de flexión.....	50
Figura 4.6 - Panel de CLT sometido a flexión en el plano, susceptible a volcamiento de canto, $\lambda V, canto$	54
Figura 4.7 - Tensiones debidas a solicitudes de cizalle	55
Figura 4.8 - Ejemplo de distribución de tensiones de corte en un panel de 5 capas sometido a cizalle fuera del plano.....	55
Figura 4.9 - Distribución de esfuerzo de corte en las láminas de un panel de CLT de 5 capas.....	57
Figura 4.10 - Mecanismos de falla I, II y III en paneles de CLT sometidos a cizalle en el plano.....	58
Figura 4.11 - Tensiones debidas a solicitudes de compresión en el plano.....	60
Figura 4.12 - Panel de CLT sin refuerzo, sometido a una carga concentrada fuera del plano.	64
Figura 4.13 - Panel de CLT con refuerzo, sometido a una carga concentrada fuera del plano.	66
Figura 4.14 - Espaciamiento de tornillos y capa crítica en panel de CLT reforzado.....	67
Figura 4.15 - Tensiones debidas a solicitudes de tracción.....	68

Figura 5.1 - Criterios para el cumplimiento de la resistencia al fuego	75
Figura 5.2 - Fenómeno de combustión y carbonización.....	76
Figura 5.3 - Condiciones posibles que determinan el supuesto de tasa de carbonización	77
Figura 5.4 - Esquema de carbonización en un panel de CLT con tasa $\beta015$	78
Figura 5.5 - Método de la sección efectiva en CLT.....	80
Figura 5.6 - Variación en el espesor de carbonización en función del tiempo para $tch < tf$	82
Figura 5.7 - Variación en el espesor de carbonización en función del tiempo para $tch = tf$	83
Figura 6.1 - Marco conceptual de los requerimientos normativos para el acondicionamiento térmico (elaboración propia).....	95
Figura 6.3 - Ejemplo de cálculo de resistencia térmica de muro perimetral de CLT.....	100
Figura 6.4 - Condensación superficial e intersticial.....	101
Figura 6.5 - Perfiles de presión de vapor de agua y de temperatura para el caso base con membrana de polietileno.....	105
Figura 7.1 - Configuración de uniones.....	110
Figura 7.2 - Escenarios de aislamiento de ruido	111
Figura 7.3 - Trasmisión de ruido en los edificios.....	112
Figura 7.4 - Aislación acústica según el espesor de panel de CLT	114
Figura 7.5 - Uniones entre paneles de CLT con conectores discretos	116
Figura 7.6 - Productos para desacoplamiento anti-vibratorios (conectores resilientes)	118
Figura 7.7 - Tipos de piso flotante sobre losas de CLT	119
Figura 7.8 - Ejemplo de puente acústico por conectores metálicos uniendo paneles de CLT	120
Figura 7.9 - Aplicación bandas Acústicas.....	121
Figura 7.11 - Ejemplo de aplicación de estrategias de aislación acústica	122
Figura 7.10 - Aplicación de láminas fonoaislantes.....	122
Figura 8.1 - Marco conceptual de durabilidad de la madera. Se destacan los conceptos abarcados en el presente capítulo (elaboración propia).....	128
Figura 8.2 - Partes del tronco de un árbol	129
Figura 8.3 - Agentes de degradación de la madera	130
Figura 8.5 - Fuentes de humedad.....	132
Figura 8.6 - Ubicación de puntos críticos edificación de CLT.....	135
Figura 8.7 - Detalle constructivo tipo para unión muro fundación - UMF	136
Figura 8.9 - Detalle constructivo tipo para complejo techumbre	138
Figura 8.8 - Tipologías de techumbre.....	139
Figura 8.10 - Detalle constructivo tipo para aberturas en muros	140
Figura 8.11 - Detalle constructivo tipo para unión muro losa muro - UMLM.....	142

Figura 8.13 - Detalle constructivo tipo para balcones.....	144
Figura 8.12 - Tipos de conexión de balcones.....	145
Figura 8.14 - Diagrama de flujo para la asignación de nivel de riesgo (Elaboración propia)	152
Figura 9.1 - Significado de las distintas soluciones constructivas.....	160

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a las empresas socias del Centro UC de Innovación en Madera, CMPC, Aruaco, Simpson Strong Tie, Arxada Quimetal y Mamut por su gran disposición a compartir información de los productos comercializados en Chile, entregar retroalimentación en etapas tempranas y realizar sugerencias pertinentes a la realidad nacional. Especial agradecimiento a Enrique McManus, Gustavo Donoso, Valentino Reveco y Cristián Barria, por disponer de su tiempo y conocimiento para los actos mencionados.

A la División Técnica de Estudios y Fomento Habitacional (DITEC) del Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) como contraparte técnica del proyecto, representada por Susana Jara, Oscar Loyola, Camilo Lanata y Xavier Irazoqui, por su revisión y retroalimentación especializada desde el punto de vista de la experiencia en obras públicas, con conocimientos más amplios de los que podrían haber llegado los propios autores sin su ayuda.

A Sebastián Nova y Rodrigo Osorio, representantes de Sonoflex, por su generosa asesoría, revisión y retroalimentación temprana como especialista en el diseño acústico de proyectos, como un acto de compromiso profesional por el buen diseño acústico de las edificaciones.



Cristóbal Reyes, Vicente López, Pablo Guindos
**Guía de diseño y especificación
de madera contralaminada (CLT)**